

Manöverübergreifende autonome Fahrzeugführung in innerstädtischen Szenarien am Beispiel des Stadtpilotprojekts

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jörn Marten Wille

aus Braunschweig

Eingereicht am: 13. April 2012

Mündliche Prüfung am: 2. Oktober 2012

- 1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer
- 2. Berichterstatter: Prof. Ph.D. J. Christian Gerdes
- 3. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Form

2012

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein System zur manöverübergreifenden autonomen Fahrzeugführung in realer städtischer Umgebung vorgestellt, das auf der praktischen Erfahrung aus der Teilnahme an der DARPA Urban Challenge beruht und im Projekt Stadtpilot weiter vertieft wurde. Die Analyse englisch- und deutschsprachiger Veröffentlichungen hat gezeigt, dass sich die autonome Fahrzeugführung bisher vorrangig auf ausgewählte Szenarien wie autobahnähnliche Umgebungen oder Geländefahrten und auf selektierte Fahrmanöver beschränkt hat. Das Verhalten der Fahrzeuge ergibt sich dabei meist durch eine Aneinanderreihung unterschiedlicher Fahrmanöver. Die Umgebungsbedingungen des Braunschweiger Stadtrings sind hingegen für ein ausschließlich manöverbasiertes autonomes Fahren aufgrund der hohen Anzahl an gefahrenen Fahrmanövern pro Streckenlänge sowie der großen Menge an verschiedenen Situationsvarianten sehr vielfältig. Ziel ist daher eine manöverübergreifende Optimierung aufeinanderfolgender Fahrmanöver sowie eine Kombination unterschiedlicher Konzepte zur Entscheidungsfindung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür ein System zur Umsetzung von Fahrentscheidungen etabliert, das manöverübergreifend und unabhängig vom gewählten Verfahren zur Entscheidungsfindung Trajektorien in Bezug auf Krümmung und Krümmungsänderung optimiert. Die resultierenden Trajektorien minimieren im Vergleich zu klassischen Verfahren die Lenkaktivität und die Querbeschleunigung bei autonomen Fahrten. Die entwickelten Ansätze wurden mit den Versuchsfahrzeugen Caroline in der DARPA Urban Challenge und mit Leonie auf dem Braunschweiger Stadtring erfolgreich getestet. In einer Weltpremiere wurde Leonie im Oktober 2010 der Öffentlichkeit vorgestellt und befuhr ein Teilstück des Braunschweiger Stadtrings mehrfach autonom im alltäglichen Straßenverkehr. Das in dieser Arbeit vorgestellte System zur manöverübergreifenden autonomen Fahrzeugführung hat dazu einen entscheidenden Beitrag geleistet.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur für elektronische Fahrzeugsysteme am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer für die Möglichkeit, im faszinierenden Themengebiet der autonomen Straßenfahrzeuge kontinuierlich wissenschaftlich zu arbeiten. Seine zahlreichen Anregungen und Hinweise waren die Grundlage für den Erfolg dieser Arbeit. Besonders der große Gestaltungsfreiraum bei Aufbau und Etablierung des Stadtpilot-Projekts hat mir die Möglichkeit zur freien Entfaltung gegeben.

Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Form als Drittberichterstatter danken. Die Möglichkeit, in der von ihm aufgebauten Forschungsgruppe zur DARPA Urban Challenge an diesem spannenden Wettbewerb teilzunehmen, war sowohl in fachlicher Hinsicht als auch mit Blick auf die Zusammenarbeit im Team eine einmalige Möglichkeit, intensive Berufserfahrung zu sammeln.

Herrn Prof. J. Chris Gerdes, den ich während meiner Zeit am Institut sehr schätzen lernte, möchte ich herzlich für die Übernahme des Korreferats danken. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Rolf Ernst.

Diese Arbeit wäre ohne die gute Zusammenarbeit meiner zahlreichen Kollegen nicht möglich gewesen. Falko Saust danke ich für das kollegiale Betriebsklima und die wertvolle Zusammenarbeit über viele Jahre. Meinem früheren Kollegen Dr. Jan Effertz bin ich für die vielen wertvollen Diskussionen in den vergangenen Jahren und die außergewöhnlich gute Zusammenarbeit während der Urban Challenge sehr dankbar. Ein herzlicher Dank sei an die Mitglieder des Stadtpilot-Teams Andreas Reschka, Tobias Nothdurft, Sebastian Ohl, Sven Böhme und Jan Gacnik sowie an die Mitarbeiter des früheren Urban-Challenge-Teams Dr. Christian Berger und Kai Homeier gerichtet.

Wichtig für das Gelingen der Forschungsarbeiten an autonomen Straßenfahrzeugen war darüberhinaus die Unterstützung von Benjamin Bieber, Nils Budach, Horea Cernat, Martin Escher, Ole Hain, Philip Heck, Simon Hermann, Sebastian Klawitter, Antonio Kolossa, Volker Labenski, Richard Matthaei, Rüdiger Meyer, Nils Perzborn,

Falko Saust und Tobias Scheide, die im Rahmen des Stadtpilot-Projekts Studien- und Diplomarbeiten anfertigten.

Dr. Veronika Krapf und Dr. Bernd Lichte bin ich für die Korrekturvorschläge und die gute Zusammenarbeit der vergangenen Jahre sehr verbunden. Tobias Müller danke ich außerordentlich für die vielen wertvollen Diskussionen zu wissenschaftlichen Themen. Ferner möchte ich die Kollegen Peter Bergmiller und Asem Eltaher nennen, die maßgeblich an der konstruktiven Zusammenarbeit am Institut beteiligt sind.

Meinem Freund Hans-Georg Büsing habe ich viele wertvolle Korrekturvorschläge und intensive Diskussionen zu vielfältigen beruflichen Themen zu verdanken. Meinen Eltern danke ich für die Ermöglichung und Unterstützung meines Ausbildungsweges im In- und Ausland und den wertvollen Rückhalt bei Erstellung dieser Arbeit.

Braunschweig, im März 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Kontext der Arbeit	3
1.2	Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag	4
1.3	Struktur der Arbeit	6
 Teil I: Forschungsstand		 9
2	Weltweite Forschung	10
2.1	Autonomes und automatisches Fahren	11
2.2	Forschungsgruppen	12
2.2.1	Universität der Bundeswehr, München	12
2.2.2	Fraunhofer IITB, Karlsruhe	14
2.2.3	Sonderforschungsbereich Kognimobil	15
2.2.4	Technische Universität Braunschweig	16
2.2.5	Universita di Parma, VisLab, Parma, Italien	18
2.2.6	Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA	19
2.2.7	Stanford University, Stanford, USA	20
2.2.8	California PATH-Programm, USA	21
2.2.9	Japanische Forschungsaktivitäten	22
2.3	Wettbewerbe für unbemannte Fahrzeuge	24
2.3.1	DARPA Grand Challenges	24
2.3.2	DARPA Urban Challenge 2007	26
2.3.3	European Land-Robot Trial	27
3	Team CarOLO in der DARPA Urban Challenge	29
3.1	Wettbewerbsanforderungen	29
3.1.1	Regelwerk	29
3.1.2	Abgeleitete Systemanforderungen	31
3.2	Wettbewerbsverlauf und Ergebnisse	32
3.2.1	Wettbewerbsverlauf des Teams CarOLO	33
3.2.2	Lessons Learned	40

Teil II: Projekt Stadtpilot 43

4 Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring 44

4.1	Projektrahmen	45
4.2	Szenarien	45
4.2.1	Umrundung der Innenstadt auf dem Braunschweiger Stadtring	46
4.2.2	Auftaktszenario im Nordosten des Stadtrings	47
4.3	Wissenschaftliche Herausforderungen	49
4.4	Gegenüberstellung mit der DARPA Urban Challenge	52
4.4.1	Neue Rahmenbedingungen	52
4.4.2	Vielfältigere Infrastruktur	54
4.4.3	Vielfältigere Umfeldbedingungen	56
4.4.4	Gestiegene Versuchsträgeranforderungen	58
4.5	Ein Vergleich mit VaMP	60

5 Analyse der Stadtpilot-Umgebung 63

5.1	Ableitung der Anforderungen	63
5.2	Manöverübergreifende autonome Fahrzeugführung	67
5.3	Manöverübergreifende Realisierung von Fahrentscheidungen	71
5.4	Manöverübergreifende assistierende Systeme	74

Teil III: Autonome Fahrzeugführung 77

6 Theoretische Grundlagen 78

6.1	Begriffe der Fahrdynamik	78
6.2	Bewertungskriterien der Fahrdynamik	80
6.2.1	Gütemaße in der Fahrzeugführung	81
6.2.2	Direkte Messgrößen	83
6.2.3	Abgeleitete Beurteilungsmaße	84
6.3	Mathematische Beschreibung von Spline-Algorithmen	85
6.3.1	Non-Uniform Rational B-Spline	85
6.3.2	Smoothing Splines	87
6.4	Manöverselektive Trajektorienplanung	88
6.4.1	Sigmoidbasierte Darstellung	89
6.4.2	Splinebasierte Darstellung	90

7 Fahrzeugarchitektur 93

7.1	Beschreibung der Versuchsträger	93
7.1.1	Aktorik	94

7.1.2	Sensorik	94
7.1.3	Ortungssystem	98
7.1.4	Energiekonzept und Rechnerplattform	98
7.2	Systembeschreibung	101
7.2.1	Funktionale Systemarchitektur	101
7.2.2	Entkoppelte Entscheidungsumsetzung	104
7.2.3	Mehrstufiges System zur Fahrzeugführung	105
7.2.4	Manöverübergreifende Entscheidungsumsetzung	108
8	Optimiertes Fahrverhalten	110
8.1	Definition der Anforderungen	111
8.2	Kartenbasierte manöverübergreifende Trajektorienplanung	112
8.2.1	Toleranzband als Optimierungsspielraum	113
8.2.2	Planungsalgorithmus	114
8.2.3	Geschwindigkeitsplanung	129
8.3	Längs- und Querregelung	130
9	Fahrversuche und Evaluation	132
9.1	Simulierte Fahrversuche	132
9.1.1	Virtueller Testkurs	133
9.1.2	Auswertung der Simulationsergebnisse	136
9.2	Fahrversuche mit dem Testträger Leonie	138
9.2.1	Szenario auf dem Testgelände	139
9.2.2	Auswertung der Fahrversuche	140
9.3	Zusammenfassung	143
Teil IV:	Abschluss	145
10	Autonome Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring	146
10.1	Inbetriebnahme auf dem Testgelände	146
10.2	Experimentelle Ergebnisse	148
11	Schlussbetrachtung	160
11.1	Zusammenfassung	160
11.2	Ausblick	162
Anhang		163
A	Kubischer Smoothing Spline	164

B	Iterative Optimierung	168
B.1	Optimierung im Toleranzband	168
B.1.1	Legende	168
B.1.2	Trajektorienverlauf	168
B.2	Krümmungsverlauf der Optimierung	170
B.2.1	Legende	170
B.2.2	Krümmungsverlauf	170
C	Optimierungsverfahren nach Nelder-Mead	172
C.1	Grundlagen	172
C.2	Beschreibung des Verfahrens	175
D	Ausgewählte Publikationen	177
	Literatur	186

1 Einleitung und Motivation

Die Idee einer autonomen, fahrerlosen Fahrt im realen Straßenverkehr fasziniert die Forscher in der Automobilindustrie bereits seit vielen Jahren. Der technische Fortschritt, insbesondere durch die Einführung immer neuer Elektronikkomponenten im Kraftfahrzeug, ermöglichte in den vergangenen Jahren eine große Vielfalt an Forschungsprojekten im Bereich der autonomen Straßenfahrzeuge.

Faszination
der fahrerlosen
Straßenfahrzeuge

Bereits Mitte der 1980er Jahre wurden erste automatische Fahrten auf einem für den allgemeinen Verkehr noch nicht freigegebenen Autobahnabschnitt dargestellt (Zapp, 1988). Anfang der 1990er Jahre leisteten das Vita-Projekt in Deutschland (Ulmer, 1992), das CMU-Navlab-Projekt in den USA (Thorpe et al., 1988) und das PVS-Projekt in Japan (Hattori et al., 1992) Pionierarbeit auf dem Forschungsfeld des autonomen Fahrens, wodurch ihnen eine sehr hohe Aufmerksamkeit zuteil wurde. Im europäisch geförderten CLEOPATRA¹-Projekt im Rahmen von ESPRIT² konnte ein automatischer Fahrbetrieb auf öffentlichen Autobahnen in einem Geschwindigkeitsbereich bis zu 180 km/h erreicht werden. Auf einer Langstreckenfahrt von München nach Odense (Dänemark) im November 1995 wurden 95 Prozent der experimentell zurückgelegten Strecke mit automatischer Quer- und Längsführung absolviert (Maurer, 2000).

Pionierarbeiten
und erste Lang-
streckentests in
den 1990er Jahren

Mit der Ausschreibung der ersten DARPA³ Grand Challenge für das Jahr 2004 rückten die Aktivitäten erneut in den öffentlichen Fokus. Das Fahrzeug, das als erstes den 150-Meilen-Kurs innerhalb von zehn Stunden durch die Mojave-Wüste von Barstow nach Primm autonom absolvieren würde, sollte das Preisgeld in Höhe von einer Million Dollar gewinnen. Der Ausgang des Wettbewerbs war weitestgehend ein Misserfolg, denn selbst das erfolgreichste Fahrzeug konnte lediglich 7,4 Meilen zurücklegen (Walton, 2009). Als Konsequenz wurde mit neuem Qualifikationsprozess und doppeltem Preisgeld die DARPA Grand Challenge 2005 ausgerufen.

DARPA Grand
Challenges

¹Clusters of Embedded Parallel Time Critical Applications

²European Strategic Programme for Research and Development in Information Technologies

³Defense Advanced Research Projects Agency, die Technologieabteilung des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums

Fünf Teams absolvierten die komplette Strecke von 132,2 Meilen, und das Stanford Racing Team gewann mit einem modifizierten Touareg namens Stanley den Wettbewerb (Thrun et al., 2006).

Autonomes Fahren
in stadtähnlicher
Umgebung

Zur weiteren Erhöhung des Schwierigkeitsgrades veranstaltete die DARPA die Urban Challenge 2007, die im kalifornischen Victorville stattfand. Im Unterschied zu bisherigen Aktivitäten fuhren in der Urban Challenge erstmals in größerem Umfang autonome Straßenfahrzeuge in einer städtischen Umgebung. Preisgelder von insgesamt 3,5 Millionen Dollar waren für die ersten drei Teams ausgeschrieben, die einen in drei Missionen unterteilten 60-Meilen-Parcours innerhalb von weniger als sechs Stunden absolvierten und die geringsten Abzüge durch Regelverletzungen vorzuweisen hatten. Unter den sechs Fahrzeugen, die die drei Missionen vollständig erfüllten, benötigte der Roboter des Teams Tartan Racing (Carnegie Mellon University) die kürzeste Zeit und gewann die DARPA Urban Challenge vor dem Stanford Racing Team (Stanford University) und dem Team VictorTango (Virginia Tech).

Erforschung von
Systemen zur
Fahrerassistenz

Umfangreiche autonome Fahrten wie in den DARPA-Wettbewerben sind im realen Straßenverkehr zurzeit noch nicht denkbar. Allerdings unterstützen die dargestellten Aktivitäten die bedeutenden Fortschritte im Bereich der Fahrerassistenzsysteme. Während durch Systeme zur passiven Sicherheit die Anzahl an Verkehrstoten in den letzten Jahrzehnten erheblich gesenkt werden konnte (Statistisches Bundesamt Deutschland, 2011), entwickeln Automobilhersteller für eine weitere Erhöhung der Verkehrssicherheit verstärkt aktive Sicherheitssysteme, die in das Fahrverhalten des Fahrzeugs eingreifen. Die Verfügbarkeit von Sensoren zur Umfeldwahrnehmung und zur Beobachtung der Fahrdynamik in Verbindung mit einer leistungsfähigen und zugleich kostengünstigen Verarbeitungselektronik hat es in den vergangenen Jahren ermöglicht, dass die Automobilhersteller das Angebot an fahrerunterstützenden Systemen kontinuierlich erweitert haben. Die Entwicklung einer automatischen Distanzregelung (ACC⁴) oder eines Assistenten zur Einhaltung eines Fahrstreifens sind nur zwei Applikationsbeispiele in heutigen Serienfahrzeugen, die auf die Forschungsaktivitäten im Bereich des autonomen Fahrens auf Autobahnen zurückzuführen sind (Franke et al., 1994) und erst den Anfang einer Vielfalt von fahrerunterstützenden Systemen im Kraftfahrzeug beschreiben.

⁴Adaptive-Cruise-Control

1.1. Kontext der Arbeit

Die DARPA Wettbewerbe entwickelten sich durch ihre große Öffentlichkeitswirksamkeit und Innovationskraft zu einer Demonstration des aktuell technisch Machbaren. Die vorliegende Arbeit ist initiiert durch die Teilnahme der Technischen Universität Braunschweig an der DARPA Urban Challenge mit dem Team CarOLO. Institute aus der Elektrotechnik, der Informatik und aus dem Maschinenbau haben von Mitte 2006 bis zur DARPA Urban Challenge am 3. November 2007 das autonome Straßenfahrzeug Caroline entwickelt. Als einer von elf der ursprünglich 89 teilnehmenden Wettbewerber erreichte die Technische Universität Braunschweig das Finale und gehörte damit gemeinsam mit der Universität Karlsruhe zu den erfolgreichsten europäischen Teilnehmern der Challenge.

Caroline in der
Urban Challenge

Teilnahme am
Finale

Die gesammelten Erfahrungen werden mittlerweile in einem Folgeprojekt mit dem Namen Stadtpilot vertieft. Ziel des Projekts ist die vollständig autonome Fahrzeugführung mit einem Straßenfahrzeug auf dem Braunschweiger Stadtring. Die Herausforderungen dieses Projekts liegen in der im Vergleich zu einem Autobahn- oder dem Urban-Challenge-Szenario vielfältigeren Umgebung: Der dichte reale Verkehr auf der Fahrbahn mit mehreren Fahrstreifen stellt hohe Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung, die engen Straßen erfordern eine präzise Trajektorienplanung, das teilweise nicht-kooperative Fahrverhalten des Verkehrsumfeldes verlangt neue Ansätze zur Verhaltensentscheidung und die dichte, urbane Bebauung erschwert die exakte Positionsbestimmung über Satellitennavigationssysteme. Die Szenarien beinhalten neben Kreuzungssituationen und Fahrstreifenwechseln weitere herausfordernde Aufgaben wie Ein- und Ausparkvorgänge sowie das Einfädeln in den fließenden Verkehr bei Geschwindigkeiten von bis zu 60 km/h. Für das Vorhaben werden eine neue Generation an Testträgern mit den Namen Henry und Leonie entwickelt (Wille et al., 2009, 2010c). Das Stadtpilot-Projekt ist ein wesentlicher Baustein des Forschungsbereichs „Intelligentes Fahrzeug“ am Niedersächsischen Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik (NFF). An zwei verschiedenen Standorten⁵ wird an der Forschungsvision des Metropolitan Car gearbeitet, das sich verträglich in die urbane Lebenswelt einfügt und einen situationsspezifischen Unterstützungsbedarf

Folgeprojekt
Stadtpilot

Reale städtische
Umgebung des
Braunschweiger
Stadtrings

Testträger Henry
und Leonie

Projekthaus Stadt-
pilot am NFF

⁵Bei den zwei Standorten handelt es sich um den Neubau am Braunschweiger Forschungsflughafen und den Mobile Life Campus in Wolfsburg.

bietet (NFF, 2010). Für die Entwicklung der beiden Testträger wurde am Standort Wolfsburg das Stadtpilot-Projekthaus gegründet.

1.2. Zielsetzung und wissenschaftlicher Beitrag

Diese Arbeit beschreibt ein System zur autonomen Fahrzeugführung in realer städtischer Umgebung, das auf den Erfahrungen aus der Teilnahme der Technischen Universität Braunschweig an der Urban Challenge aufbaut und im Projekt Stadtpilot umfassend erforscht wurde. Der Schwerpunkt liegt auf einem Verfahren zur manöverübergreifenden Umsetzung von Fahrentscheidungen⁶.

Bisherige Systeme zur autonomen Fahrzeugführung sind meist auf autobahnähnliche Umgebungen oder Geländefahrten ausgerichtet oder auf ausgewählte Fahrmanöver beschränkt. Das Fahrverhalten wird überwiegend durch eine Aneinanderreihung unterschiedlicher Fahrmanöver erreicht (u.a. (Müller, 1996; Tölle, 1996)). Die Umgebungsbedingungen durch das reale nicht-kooperative Verkehrsumfeld des Braunschweiger Stadtrings sind hingegen für ein rein manöverbasiertes Fahren sehr vielfältig, denn im Vergleich zu autobahnähnlichen Umgebungen ist die Anzahl an gefahrenen Fahrmanövern⁷ pro Zeiteinheit und Strecke sowie deren Variabilität deutlich höher. Die Erfahrungen der Urban Challenge haben gezeigt, dass eine Kombination manöverbasierter Fahrzeugführung mit Methoden des verhaltensbasierten Fahrens sinnvoll ist, die Szenen generalisiert behandelt und nicht in Fahrmanöver unterteilt⁸. Durch die Verknüpfung von Methoden manöverbasierter und verhaltensbasierter Fahrzeugführung ist es möglich, die Komplexität städtischer Verkehrsszenen durch eine Reduzierung an unterschiedlichen, in der Aktionsplanung abzubildenden Fahrmanövern besser beherrschbar zu machen.

Die deutlich höhere Häufigkeit von Fahrmanövern in städtischen Szenarien und die Kombination verschiedener Ansätze der autonomen Fahr-

⁶Als Fahrentscheidungen werden im Rahmen dieser Arbeit die taktischen Vorgaben (Aktionen) zur Führung eines Fahrzeugs verstanden, die ein Fahrzeug regelkonform und kollisionsfrei durch eine Umgebung leiten.

⁷Unter einem Fahrmanöver wird eine definierte Sequenz von Aktionen verstanden, die als abgeschlossene Einheit betrachtet werden kann. Fahrstreifenwechsel, Abbiege- oder Einparkvorgänge werden beispielsweise in diesem Sinne als Fahrmanöver bezeichnet.

⁸Ein Beispiel für einen manöver- und verhaltensbasierten Umgang mit einer Szene des Braunschweiger Stadtrings ist in Abschnitt 5.2 beschrieben.

Realisierung
autonomer
Fahrzeugführung
im realen
Stadtverkehr

Stadtverkehr für
rein manöver-
basierte Fahrzeug-
führung sehr
vielfältig

zeugführung wirken sich analog auf die Umsetzung von Fahrentscheidungen aus. Durch eine hohe Dichte an aufeinanderfolgenden Fahrmanövern wird eine manöverübergreifende Optimierung sinnvoll, um auch Aspekte des Fahrkomforts und einer fahrdynamisch sicheren Querführung ausreichend zu berücksichtigen. Zusätzlich führt der Einsatz unterschiedlicher Methoden zur Aktionsplanung zu einer entkoppelten Trajektorienplanung. Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit besteht daher in einem System, das manöverübergreifend sowie unabhängig vom gewählten Ansatz der Entscheidungsfindung ein optimiertes und sicheres Fahrverhalten ermöglicht. Unter Einbeziehung von A-Priori-Wissen in Form von Kartenmaterial und dem dynamisch erkannten Umfeld werden manöverübergreifend Fahrentscheidungen realisiert. Die Kenntnis des kompletten Straßenverlaufs ermöglicht es, Kurven optimal anzufahren und damit die Lenkaktivität sowie die Querbeschleunigung bei autonomen Fahrten zu minimieren. Das Resultat ist ein flexibles System zur optimierten Realisierung von Fahrentscheidungen. Bei einer rein manöverbasierten Darstellung würde sich die Gesamttrajektorie hingegen aus der Summe der einzelnen Manövertrajektorien ergeben, so dass nur eine manöverselektive, eingeschränkte Optimierung möglich wäre. Damit ergibt sich ein im Vergleich zur manöverübergreifenden Optimierung weniger flüssiges Gesamtfahrverhalten, dass auch für die Insassen im Fahrzeug deutlich spürbar ist.

Manöverun-
abhängige
Umsetzung des
Fahrverhaltens

Optimiertes
Fahren

Der Schnittstelle zwischen Verhaltenssteuerung und Trajektorienplanung kommt bei der Umsetzung eine besondere Bedeutung zu. Zur Gewährleistung eines hohen Maßes an Sicherheit ist die Schnittstelle derart definiert, dass unabhängig vom Ansatz zur Entscheidungsfindung beliebige Fahrentscheidungen abgebildet werden. Die Schnittstelle macht es damit möglich, in Bezug auf Querbeschleunigung und Lenkaktivität optimierte Trajektorien mit einem einstellbaren Optimierungsgrad zu bestimmen.

Das vorgestellte System zur manöverübergreifenden Realisierung von Fahrentscheidungen ist nicht auf eine Anwendung in autonomen Straßenfahrzeugen beschränkt, sondern es besteht auch die Möglichkeit der Übertragung auf Fahrerassistenzsysteme. Im Rahmen des Forschungsprojekts AKTIV⁹ wurde beispielsweise die Machbarkeit einer aktiven Gefahrenbremsung untersucht (Reichel et al., 2010). Mit Hilfe einer Ausweichanalyse bestimmt ein Assistenzsystem, ob der Fahrer eine Kollision

Übertragung auf
Fahrerassistenz-
systeme möglich

⁹Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr

selbsttätig verhindern kann. Erst wenn ein Ausweichen unmöglich ist, greift das Assistenzsystem zur aktiven Gefahrenbremsung in die Längsführung ein. Das im Rahmen dieser Dissertation vorgestellte System kann auch in der Ausweichanalyse einen wichtigen Beitrag leisten, wie im Verlauf dieser Arbeit gezeigt wird.

1.3. Struktur der Arbeit

	1	Einleitung
Teil I: Forschungs- stand	2	Weltweite Forschung
	3	Team CarOLO in der DARPA Urban Challenge
Teil II: Projekt Stadtpilot	4	Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring
	5	Analyse der Stadtpilot-Umgebung
Teil III: Autonome Fahrzeugführung	6	Theoretische Grundlagen
	7	Fahrzeugarchitektur
	8	Optimiertes Fahrverhalten
	9	Fahrversuche und Evaluation
Teil IV: Abschluss	10	Autonome Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring
	11	Schlussbetrachtung

Die vorliegende Arbeit ist in vier Teile und elf Kapitel gegliedert. Nach diesem ersten Kapitel mit Einleitung und Motivationsbeschreibung stellt der erste Teil den Forschungsstand im Bereich autonomer Landfahrzeuge in zwei Kapiteln dar. Dazu gibt Kapitel 2 einen Einblick in weltweit bedeutende Forschungsarbeiten. Es werden sowohl die führenden Forschergruppen als auch die bekanntesten Wettbewerbe für unbemannte Fahrzeuge vorgestellt. In Kapitel 3 wird die Teilnahme der Technischen

Universität Braunschweig an der DARPA Urban Challenge beschrieben. Neben einer Zusammenfassung der Wettbewerbsanforderungen und einer Darstellung des Wettbewerbsverlaufs aus Sicht des Braunschweiger Teams schließt der Abschnitt mit einer Bestandsaufnahme in Form von „Lessons Learned“ ab.

Der zweite Teil stellt das Projekthaus Stadtpilot vor und leitet die wissenschaftliche Fragestellung dieser Arbeit aus den Anforderungen der Stadtring-Umgebung ab. Kapitel 4 formuliert neben dem Projektrahmen und den Szenarien die wissenschaftlichen Herausforderungen des Projekts. Eine ausführliche Diskussion des Vorhabens im Vergleich zur DARPA Urban Challenge zeigt den Neuigkeitsgrad des Projekts. Kapitel 5 nimmt eine Analyse der Stadtpilot-Umgebung vor und leitet die Anforderungen an das Fahrzeugführungssystem ab.

Im dritten Teil wird darauf aufbauend das im Zuge dieser Arbeit entwickelte System zur Fahrzeugführung in städtischer Umgebung beschrieben. Zunächst sind in Kapitel 6 einige theoretische Grundlagen zusammengestellt. Kapitel 7 führt die Fahrzeugarchitektur und das mehrstufige System zur Fahrzeugführung ein und leitet in das System zur Realisierung von Fahrentscheidungen über. Wesentlicher Bestandteil des Systems ist ein Algorithmus, der in drei Stufen manöverübergreifend querbeschleunigungs- und stellgrößenoptimierte Trajektorien berechnet. Kapitel 8 beschreibt diesen im Stadtpilot-Projekt entwickelten Algorithmus im Detail und stellt darüber hinaus die Module zur Geschwindigkeitsplanung und Fahrzeugregelung vor. Der dritte Teil schließt mit der Auswertung von Fahrversuchen in Kapitel 9.

Den Abschluss dieser Dissertation bildet der vierte Teil, in dem das erste Stadtpilot-Szenario auf dem Braunschweiger Stadtring analysiert wird. Es folgen eine Zusammenfassung der Arbeit sowie ein Ausblick auf offene und zugleich interessante wissenschaftliche Fragestellungen.

TEIL I: FORSCHUNGSSTAND

Der erste Teil dieser Dissertation stellt weltweit herausragende Arbeiten im Forschungsbereich autonomer Landfahrzeuge vor. Neben der Darstellung führender Forschergruppen werden die bekanntesten Wettbewerbe für unbemannte Fahrzeuge und die Teilnahme der Technischen Universität Braunschweig an der DARPA Urban Challenge detailliert beschrieben.

2 Weltweite Forschung

Forschungsarbeiten
beginnen in den
1970er Jahren

Im Vergleich zu den sehr frühen Forschungsaktivitäten im Bereich autonomer Landfahrzeuge in den 1970er Jahren (Tsugawa et al., 1979) ist die Anzahl an Forschungsprojekten in diesem Bereich in den vergangenen Jahren erheblich gestiegen (u. a. (Dickmanns et al., 1994) und (Nagel et al., 1995)). Bei der ersten Generation an Versuchsfahrzeugen handelte es sich meist um Lastkraftwagen mit ausreichend Raum für die damals sehr großvolumigen Rechneranlagen. Mittlerweile werden aufgrund der weit fortgeschrittenen Miniaturisierung der Elektronikkomponenten auch Personenkraftwagen als Versuchsträger eingesetzt, die zumeist bereits die Ansteuerung der im Fahrzeug serienmäßig vorhandenen Aktorik zur Längs- und Querverführung erlauben.

Aktivitäten meist
domänenabhängig

Die meisten Forschungsvorhaben sind domänenabhängig: Während sich die Aktivitäten im Forschungsbereich der autonomen Straßenfahrzeuge bis zur Jahrtausendwende auf autobahnähnliche Umgebungen, auf Geländefahrten und auf ausgewählte Fahrmanöver konzentrierten (Struck et al., 1994; Maurer et al., 1996; Dickmanns, 2002), interagierten in der DARPA Urban Challenge erstmals zahlreiche autonome Straßenfahrzeuge in einer stadtähnlichen Umgebung.

Neben der technischen Machbarkeit ist die Bereitstellung notwendiger Finanzmittel eine weitere ausschlaggebende Triebfeder der rasanten Entwicklung im Forschungsbereich autonomer Systeme. Zahlreiche öffentlich geförderte Projekte wie beispielsweise das bekannte PROMETHEUS¹-Projekt (Gillan, 1989) haben dazu einen entscheidenden Beitrag geleistet. Auch die DARPA Challenges haben die weltweiten Forschungsvorhaben in einen außergewöhnlichen öffentlichen Fokus gerückt. Neben der Vorstellung einiger besonderer Forschungsgruppen werden daher im Folgenden auch die bekannten weltweiten Wettbewerbe beschrieben (u.a. (JFR, 2008a,b,c)). Dieses Kapitel erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Aufgrund der großen Anzahl an Forschungsgruppen weltweit²

¹Programme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety

²Allein an der DARPA Urban Challenge waren anfänglich 89 verschiedene Teams beteiligt.

wird im Folgenden nur eine Auswahl vorgestellt, die sich über viele Jahre maßgebend im Forschungsbereich autonomer Straßenfahrzeuge durch Veröffentlichungen und Vorführungen bewiesen haben (u.a. (IV, 2007, 2008, 2009, 2010)).

2.1. Autonomes und automatisches Fahren

Im Bereich der Fahrzeugtechnik wird zwischen autonomer und automatischer Fahrzeugführung unterschieden. In (Maurer, 2000) gibt der Autor Hinweise zum Gebrauch des Begriffs Autonomie, die im Folgenden zum Teil aufgegriffen und im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden.

Der Begriff autonom im Sinne von „bordautonom“ bedeutet demnach, dass die für den Menschen geschaffene Umgebung ohne dessen Einbindung und frei von zusätzlicher Infrastruktur zur Stützung der Fahrzeugführung verwendet wird. Antsaklis und Passino beschreiben den Begriff autonom in (Antsaklis u. Passino, 1993) als sicheres Ausführen von Aufgaben trotz signifikanter Unsicherheiten der Regelstrecken und der Erkennungsprozesse in einer dynamischen Umgebung über längere Zeiträume. Als autonom wird ein Zustand der Selbständigkeit, Selbstbestimmung und Unabhängigkeit bezeichnet.

Bordautonomes
Fahren benötigt
keine zusätzliche
Infrastruktur

Der Begriff automatisch beschreibt im Vergleich „die Anwendung von techn. Mitteln, mit deren Hilfe ohne Einflussnahme des Menschen mechanisierte Arbeitsmittel teilweise oder ganz nach vorgegebenen Programmen bestimmte Operationen durchführen,...“³ (Brockhaus, 1973). Vorgesehene Vorgänge werden eigenständig ausgeführt, wobei der Mensch eine überwachende Funktion oder Teilaufgaben übernimmt und zusätzliche Infrastruktur eingebunden wird.

Automatische
Fahrzeugführung
bindet Infrastruk-
tur und/oder den
Fahrer ein

In der Forschung wird somit der Unterschied zwischen autonomer und automatischer Fahrzeugführung vorrangig mit dem Kriterium der Verantwortung des Fahrers bei der Einbindung in die Fahraufgabe und über die Verwendung zusätzlicher Infrastruktur beschrieben. Während in einem autonomen Fahrbetrieb der Fahrer vollständig von seinen Aufgaben entbunden ist, liegt die Verantwortung bei einer automatischen Fahrt in Abhängigkeit der Ausprägung der vorgenommenen Automatisierung weiterhin beim Fahrer.

³(Brockhaus, 1973), S. 178

2.2. Forschungsgruppen

Im Folgenden wird eine Übersicht weltweiter Forschungsaktivitäten gegeben, die wegweisende Arbeiten in Bezug auf autonomes Fahren geleistet haben und damit den Stand der Technik widerspiegeln.

2.2.1. Universität der Bundeswehr, München

Versuchsträger
VaMoRs, VaMP

Seit Anfang der 1980er Jahre rüstete die Forschergruppe um Prof. Dr. E.D. Dickmanns an der Universität der Bundeswehr in München die beiden Versuchsträger VaMoRs⁴ und VaMP⁵ aus (Abbildung 2.1).

Bei dem Testträger VaMoRs handelte es sich um einen 5-Tonnen Mercedes-Benz Kleinbus, der auf Basis der Echtzeit-Auswertung von Bildfolgen autonome Fahrten durch die elektronische Ansteuerung von Gas, Bremse und Lenkung erlaubte (Brüdigam, 1994; Müller, 1996). 1987 erfolgten mit VaMoRs autonome Fahrten auf einer abgesperrten Autobahn mit Geschwindigkeiten bis zu 96 km/h auf einer Kurslänge von 20 km (Zapp, 1988). Im gleichen Jahr startete die Europäische Forschungsförderungsorganisation EUREKA⁶ auf Anregung der europäischen Automobilindustrie das Projekt PROMETHEUS, in dessen Rahmen eine neue transputerbasierte Hardware-Plattform und ein Software-Paket zur Fahrstreifenerfassung (KRONOS) entwickelt wurden.



Abbildung 2.1.: Versuchsfahrzeuge VaMoRs (links), VaMP (Mitte) und MuCAR-3 (rechts) der Universität der Bundeswehr München, Bildquelle: UniBW (2009)

Gegen Ende des PROMETHEUS-Projekts baute die Gruppe in den Jahren 1993/94 den Versuchsträger VaMP auf, einen Mercedes-Benz 500 SEL, der mit ungefähr 60 Transputern⁷ ausgerüstet war, davon

⁴Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen

⁵VaMoRs PKW

⁶European Research Coordination Agency

⁷Bei einem Transputer handelt es sich um einen Parallelrechner, der einen effizienten Datenaustausch zu benachbarten Rechnern ermöglicht.

allein 46 für das Wahrnehmungssystem (Dickmanns et al., 1994; Siedersberger, 2003). Ein besonderer öffentlicher Höhepunkt wurde 1994 mit den Entwicklungen bei der Abschlussdemonstration von PROMETHEUS erreicht. Gemeinsam mit dem Schwesterfahrzeug VITA2⁸ von Daimler-Benz fuhr das Versuchsfahrzeug VaMP in regulärem Verkehr auf einer Autobahn mit drei Fahrstreifen mehr als 1000 Kilometer in einem Geschwindigkeitsbereich bis 130 km/h autonom. In einer zweiten öffentlichkeitswirksamen Demonstration der Fahrzeugfähigkeiten im Rahmen des CLEOPATRA-Projekts im Herbst 1995 wurden auf einer 1758 km langen „experimentell zurückgelegten Strecke“⁹ von München nach Odense in Dänemark 95 Prozent der Fahrt autonom absolviert (Maurer et al., 1996; Maurer, 2000). Dabei konnten Höchstgeschwindigkeiten bis zu 180 km/h erreicht werden.

Die Versuchsträger der Universität der Bundeswehr wurden in ihrem Leistungsverhalten lange Zeit nicht übertroffen. Die Fahrzeuge zeichneten sich besonders auch durch ihr fortschrittliches Wahrnehmungssystem auf Basis von Videokameras aus. Ein wichtiger Bestandteil des Systems zur Bildverarbeitung ist der von Dickmanns entwickelte 4D-Ansatz zur Bildfolgeverarbeitung, der die Kernkomponente der verwendeten Architektur darstellt. Neben der dreidimensionalen Gestalt eines Körpers kommt der Zeit eine besondere Bedeutung zu, indem die Beschreibung von Objekten durch dynamische Zustandsmodelle und 3D-Formmodelle sowohl zeitlich als auch räumlich erfolgt (Dickmanns, 1994). Klassische Verfahren des maschinellen Sehens ziehen im Unterschied dazu keinen Nutzen aus der zeitlichen Kontinuität eines Objekts, da einfache Modelle zur Beschreibung des Objektverhaltens aufgrund der nichtlinearen perspektivischen Abbildung im Bild nicht ausreichen (Neumaier u. Färber, 2006). Im 4D-Ansatz dient die zeitlich-räumliche Objektbeschreibung hingegen den speziell auf die jeweiligen Objektmerkmale zugeschnittenen Bildverarbeitungsoperatoren und ermöglicht damit eine äußerst effektive Bildverarbeitung.

Bemerkenswert war weiterhin das sogenannte EMS¹⁰-System, ein von Wirbeltieren abgeleiteter Sehmechanismus, der das Wissen über das mögliche Verhalten von Gegenständen bekannter Kategorien in bestimm-

1000 Kilometer autonom auf einer Autobahn mit drei Fahrstreifen zum Abschluss des PROMETHEUS-Projekts

4D-Ansatz zur Bildfolgeverarbeitung

⁸Vision Technology Application

⁹Nach (Maurer, 2000) wird unter der „experimentiell zurückgelegten Strecke“ diejenige Fahrstrecke verstanden, während derer das System zur automatischen Längs- und Querführung aktiv war. Damit wurde das System bei Strecken (Landstraßen, Stadtverkehr u.a.), für die das System nicht ausgelegt war, nicht aktiviert.

¹⁰Expectation-Based Multi-Focal Saccadic Vision

ten Situationen zur Steuerung von Blickrichtung und Aufmerksamkeit nutzt (Dickmanns, 2007). Damit war es möglich, die Aufmerksamkeit der Kameraplattform auf die wichtigsten Details einer Szene zu lenken.

Beteiligung an
DARPA Urban
Challenge und
ELROB 2007

Mittlerweile wurde unter der Leitung von Prof. Dr. H.-J. Wünsche an der Universität der Bundeswehr ein VW Touareg V6 TDI zum MuCAR-3¹¹ als Versuchsfahrzeug der dritten Generation umgebaut. Die Ergebnisse der aktuellen Forschung wurden auf der DARPA Urban Challenge 2007 sowie der Civilian ELROB¹² 2007 demonstriert und in mehrere militärische Forschungsprojekte integriert (Hundelshausen et al., 2009).

2.2.2. Fraunhofer IITB¹³, Karlsruhe

Aufbau eines
Mercedes-Benz
Kleinbusses als
Versuchsträger

Das IITB in Karlsruhe war unter der Leitung von Prof. Dr. H.-H. Nagel sehr früh an den Planungen zum PROMETHEUS-Projekt beteiligt und eine der deutschen Forschungseinrichtungen, die im Rahmen des Projekts einen Testträger ausrüsteten. Analog zum Versuchsfahrzeug VaMoRs der Universität der Bundeswehr in München handelte es sich um einen Mercedes-Benz Kleinbus vom Typ 609D, ausgestattet mit einem zusätzlichen Diesel-Generator für die Stromversorgung. Auf Basis eines dynamischen Modells für die Bilderkennung, das je zwei Zustände für die Position des Fahrzeugs und für die Beschreibung der Straße beinhaltete, konnten sowohl Markierungen der Fahrstreifen in Fahrtrichtung als auch kreuzende Begrenzungslinien erkannt werden. Damit war es möglich, verschiedene autonome Fahrmanöver wie Fahrstreifenfolgen, Abbiegen an Kreuzungen oder Kollisionsvermeidung zu realisieren (Nagel et al., 1995).

Autobahnen
und erste
innerstädtische
Szenarien

Anfang der 1990er Jahre wurde am IITB ein neuer Versuchsträger auf Basis eines BMW 735 iL aufgebaut. Neben dem autonomen Fahren auf einer abgesperrten Autobahn in einem Geschwindigkeitsbereich bis 130 km/h wurden mit diesem Fahrzeug bereits auch innerstädtische Verkehrssituationen erforscht (Nagel u. Enkelmann, 1991). Statt der Übernahme der kompletten Fahrfunktionalität unterstützte ein Warnsystem den Fahrer in bestimmten Verkehrssituationen.

¹¹Munich Cognitive Autonomous Car

¹²European Land-Robot Trial

¹³Institute for Information and Data Processing

Mit der dritten Generation von Versuchsfahrzeugen namens DARVIN¹⁴, einem Volkswagen Passat Variant GL Baujahr 1996 (Abbildung 2.2), wurde untersucht, welche zusätzliche Unterstützung einem Fahrer durch eine Kombination von Bildfolgenauswertung und logischer Auswertung von Zwischenergebnissen gegeben werden kann (IITB, 2009). Für Behinderte sollte eine Unterstützung durch Fahrerassistenzsysteme geboten werden, indem die Einhaltung des Fahrstreifens und die Abstandsregelung überwiegend vom System übernommen wurden.



Abbildung 2.2.: Versuchsfahrzeug DARVIN des Fraunhofer IITB in Karlsruhe, Bildquelle: IITB (2009)

Im Unterschied zu bisherigen autonomen Systemen bestanden die Szenarien hauptsächlich aus innerstädtischen Verkehrssituationen, die sich durch eine Vielfalt an Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen, dichte Bebauung und komplexe Gesamtsituationen auszeichneten. Auf Basis der modellgestützten Bildfolgenauswertung wurden Algorithmen untersucht, die nicht situationsbezogen zugeschnitten, sondern situationsübergreifend anwendbar sind (IITB, 2009).

2.2.3. Sonderforschungsbereich Kognimobil

Von 2006 bis 2010 finanzierte die Deutsche Forschungsgemeinschaft den Sonderforschungsbereich Transregio 28 „Kognitive Automobile“, der sich aus Instituten der Technischen Universität München, der Universität der Bundeswehr München, der Universität Karlsruhe und des Fraunhofer IITB in Karlsruhe zusammensetzte. Ein Ziel des Sonderforschungsbereichs war es, Fahrzeuge zu entwickeln, die gefährliche Situationen erkennen und ohne Eingreifen des Fahrers beherrschen. Mit dem Anspruch, in Echtzeit komplexe Situationen sicher zu beherrschen, lagen die besonderen Forschungsschwerpunkte auf der Wahrnehmung und dem darauf aufbauenden Situationsverständnis und Fahrverhalten (Kognimobil, 2009).

Erforschung
kognitiver
Automobile im
Transregio 28

¹⁴Driver Assistance Using Realtime Vision for Innercity Areas

Als Forschungsfahrzeug stand unter anderem ein Audi Q7 mit dem Namen MUCCI¹⁵ zur Verfügung (Abbildung 2.3). Über eine E-Gas-Schnittstelle, einen pneumatischen Aktuator am Bremspedal und einen Lenkmotor wird in die Aktorik eingegriffen (Thuy et al., 2008).



Abbildung 2.3.: Forschungsfahrzeug MUCCI (links) und Testträger des Teams AnnieWay in der DARPA Urban Challenge (rechts), Bildquellen: Goebl (2009) und Darpa (2009a)

Teilnahme am
Finale der DARPA
Urban Challenge

Unter dem Teamnamen AnnieWay war der Sonderforschungsbereich bei der DARPA Urban Challenge vertreten (Stiller et al., 2008). Das Team trat mit einem umgebauten Volkswagen Passat Variant (Abbildung 2.3) an, der mit der Möglichkeit zur elektronischen Ansteuerung von Lenkrad, Gas-, Bremspedal und Getriebe ausgestattet ist (Team AnnieWay, 2009). Hauptsensor war ein 64-Ebenen-Lidarscanner der Firma Velodyne, der ein 360°-Bild der Umgebung erstellt. Zusätzlich war das Fahrzeug mit fünf Stereo-Kameras zur Unterstützung des Lidarscanners, einer Farbkamera zur Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen und einem 77-GHz-Radar zur Folgefahrtunterstützung ausgestattet. Als eines von elf Fahrzeugen erreichte das Team das Finale der DARPA Urban Challenge.

Aktuelle Arbeiten behandeln unter anderem neue Ansätze zur „optimalen Trajektorienplanung“ autonomer Straßenfahrzeuge. In (Ziegler u. Stiller, 2011) wird dazu ein Ansatz vorgestellt, der die Trajektorienplanung als Optimalsteuerungsproblem behandelt. Dazu wird ein Funktional minimiert, das die ersten zwei Ableitungen der Trajektorie enthält und unter anderem zu minimierten Beschleunigungen des Fahrzeugs beim Passieren der Trajektorie führen soll.

2.2.4. Technische Universität Braunschweig

Zur Automatisierung der Dauererprobung von Fahrzeugen entwickelte die Technische Universität Braunschweig Ende der 1990er Jahre im Projekt

¹⁵Munich's Cognitive Car Innovation

Autonomes Fahren gemeinsam mit der Volkswagen AG¹⁶ ein modulares System, durch das die Verwandlung unterschiedlicher Serienfahrzeuge in autonome Fahrzeuge bereits nach kurzer Rüstzeit ermöglicht wurde. Ziel des durch das Niedersächsische Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr geförderten Projekts war es, Serienfahrzeuge autonom auf einem vorgegebenen Kurs fahren zu lassen und reproduzierbare Testergebnisse ohne Fahrereinfluss zu erhalten (Weisser et al., 1998; Simon u. Becker, 1999). Der entwickelte Testträger Klaus (Abbildung 2.4) verwendete ein DGPS¹⁷ zur Fahrzeugortung sowie drei Laserscanner, einen Radarsensor und eine Stereokamera zur Umgebungserkennung. Um bauliche Veränderungen im Fahrzeug zu vermeiden, wurde die Aktorik als Fahrroboter realisiert, der vom Fahrersitz aus das Lenkrad und die Fahrpedale des Fahrzeugs betätigt (Becker u. Simon, 2000; Söhnitz, 2001).

Projekt Autonomes Fahren mit dem Ziel reproduzierbarer Testergebnisse ohne Fahrereinfluss

Für die Teilnahme an der DARPA Urban Challenge 2007 wurde ein Team, bestehend aus Mitarbeitern der Fachbereiche Elektrotechnik, Informatik und Maschinenbau, aufgestellt. Innerhalb von eineinhalb Jahren gelang es, das Regelwerk der DARPA Urban Challenge durch einen zu einem vollständig autonomen Straßenfahrzeug namens Caroline umgebauten Volkswagen Passat Variant (Abbildung 2.4) zu erfüllen. Das Team CarOLO war als eines von elf Teams der ursprünglich 89 teilnehmenden Wettbewerber im Finale am 3. November 2007 vertreten. Zusammen mit dem Team AnnieWay aus Karlsruhe gehörte es damit zu den erfolgreichsten deutschen Teams. Eine ausführliche Beschreibung des Fahrzeugs und der Urban Challenge sind in den Kapiteln 3 und 4 dieser Dissertation zu finden.

Erfolgreich in der Urban Challenge



Abbildung 2.4.: Versuchsfahrzeuge Klaus (links) im Projekt Autonomes Fahren und Caroline (rechts) in der DARPA Urban Challenge der Technischen Universität Braunschweig

¹⁶Weitere Partner des Projekts waren die Kasprich-Ibeo GmbH, die Robert Bosch GmbH sowie die Witt GmbH. Die Projektleitung lag bei der Volkswagen AG.

¹⁷Differential Global Positioning System

Projekt Stadtpilot
als Nachfolge

Durch das Projekt Stadtpilot werden die Erfahrungen aus der Teilnahme an der DARPA Urban Challenge mittlerweile in die reale städtische Umgebung des Braunschweiger Stadtrings übertragen. Eine ausführliche Projektbeschreibung wird im zweiten Teil dieser Dissertation gegeben.

2.2.5. Università di Parma, VisLab¹⁸, Parma, Italien

Beim VisLab handelt es sich um eine Ausgründung der Università di Parma mit dem Ziel, Wahrnehmungs- und intelligente Systeme hauptsächlich für den Automobilbereich zu entwickeln (VisLab, 2009).

MobLab als erster
Versuchsträger

Der erste am VisLab aufgebaute Versuchsträger war der sogenannte MobLab¹⁹ (Abbildung 2.5), ein Kleinbus, der im Rahmen des bekannten PROMETHEUS-Projekts mit mehreren Kameras zur Bildverarbeitung in Echtzeit ausgestattet wurde. Zwischen 1997 und 2001 baute die Forschergruppe unter der Leitung von Prof. A. Broggi im Folgeprojekt ARGO²⁰ (Abbildung 2.5) nach eigenen Aussagen Italiens erstes autonomes Straßenfahrzeug auf. Als Fahrzeugplattform diente ein Lancia Thema, der in drei verschiedenen Modi bewegt werden konnte: Manuelles Fahren, überwachtes Fahren mit akustischen und optischen Warnungen und autonomes Fahren. Haupteinsatzgebiet des Testträgers waren autobahnähnliche Umgebungen, in denen Fahrstreifen und Fremdobjekte innerhalb der eigenen Fahrbahn erkannt werden konnten. Das System war außerdem in der Lage, selbsttätig Fahrstreifenwechsel vorzunehmen. Auf einer 2000 Kilometer langen Testfahrt durch Italien wurde gezeigt, dass nur durch kamerabasierte Wahrnehmung und Verwendung von Standardkomponenten vergleichsweise günstig autonome Fahrten auf Autobahnen erreicht werden können. Trotz häufig fehlender Fahrstreifenmarkierungen und diverser Tunnel konnten über 90 Prozent der Strecke autonom bewältigt werden (Broggi et al., 1999; Argo, 2009).

Italiens erstes
autonomes
Straßenfahrzeug
im Rahmen des
ARGO-Projekts

Beteiligung an
allen DARPA
Challenges

Mit dem Team TerraMax nahm das VisLab an beiden DARPA Grand Challenges teil. Während der TerraMax-2004 in der ersten DARPA Grand Challenge lediglich knapp zwei Kilometer des Parcours' autonom zurücklegen konnte, schaffte es das Team, mit dem Versuchsträger TerraMax-2005 den Kurs von über 220 Kilometern als eines von fünf Fahrzeugen vollständig zu absolvieren. Auch an der DARPA Urban

¹⁸Artificial Vision and Intelligent Systems Laboratory

¹⁹Mobile Laboratory

²⁰Der Name ARGO ist an zwei unterschiedliche Mythen angelehnt, in denen es auch um Navigation und Wahrnehmung geht. Nähere Informationen sind auf der Internetseite des Projekts zu finden (Argo, 2009).

Challenge war das VisLab über das Team Oshkosh beteiligt und konnte das Finale mit dem Fahrzeug TerraMax T2 (Abbildung 2.5) mit nur zehn anderen Teams erreichen, schied allerdings im Verlaufe des Rennens aus.



Abbildung 2.5.: Forschungsfahrzeuge MobLab (links), ARGO (Mitte) und TerraMax T2 (rechts) des VisLab in Parma, Italien, Bildquellen: VisLab (2009) und Darpa (2009a)

2.2.6. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA

An der Carnegie Mellon University forschen zwei größere Gruppen an autonom fahrenden Straßenfahrzeugen: das Field Robotics Center unter der Leitung von Prof. R. Whittaker und das NavLab²¹ unter der Führung durch Prof. C. Thorpe.

Das Field Robotics Center hat sich auf Basis einer langen Forschungstradition vor allem in den DARPA Challenges erfolgreich behauptet. Während das sogenannte Redteam mit dem Testträger Sandstorm in der ersten Grand Challenge 2004 trotz des nahezu gescheiterten Wettbewerbs die im Vergleich längste Strecke zurücklegen konnte, belegte das Team im Folgewettbewerb die Plätze zwei und drei und konnte dabei den kompletten Parcours autonom absolvieren. Mit dem Tartan Racing Team und dem Versuchsfahrzeug Boss (Abbildung 2.6) auf Basis eines 2007 Chevrolet Tahoe gewannen sie die DARPA Urban Challenge 2007.

Am NavLab wurden seit 1984 elf verschiedene Versuchsträger mit den Namen NavLab 1 bis NavLab 11 entwickelt. Unter dem Slogan „No Hands Across America“ fuhren 1995 zwei Wissenschaftler im Testträger NavLab 5 (Abbildung 2.6), einem umgebautem 1990er Pontiac Trans Port, mit dem Softwareprogramm Ralph²² von Washington D.C. nach San Diego (Jochem et al., 1995; Pomerleau u. Jochem, 1996).

Insgesamt
erfolgreichstes
Forscherteam
in den DARPA
Wettbewerben

Semi-autonomes
Fahren quer durch
Amerika

²¹Navigation Laboratory

²²Rapidly Adapting Lateral Position Handle



Abbildung 2.6.: Testträger Boss (links), NavLab 5 (Mitte) und NavLab 11 (rechts) der Carnegie Mellon University in Pittsburgh, Bildquellen: Darpa (2009a), CMU (2009) und Navlab (2009)

Das Programm war durch einen dreistufigen Algorithmus²³ in der Lage, mit Bilderkennungsalgorithmen den Fahrbahnverlauf zu bestimmen und das Fahrzeug durch entsprechende Lenkkommandos entlang der Straße zu führen. Die Längsführung wurde allerdings weiterhin von den Forschern selbst übernommen. Insgesamt 98,1 Prozent der über 4500 km langen Strecke legte das Fahrzeug semi-autonom zurück. Der neueste Versuchsträger NavLab11 (Abbildung 2.6) basiert auf einem Jeep Wrangler, der mit einer Reihe von unterschiedlichen Sensoren für den Nah- und mittleren Fernbereich ausgestattet ist. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit Umfeldwahrnehmung und dabei speziell mit Fußgängererkennung und Nahbereichsüberwachung (Navlab, 2009).

2.2.7. Stanford University, Stanford, USA

Die Gruppe Robotics and Machine Learning am Stanford Artificial Intelligence Laboratory beschäftigt sich unter Leitung von Prof. Dr. S. Thrun schwerpunktmäßig mit probabilistischer Robotik, die Methoden der Statistik und Entscheidungsfindung auf Problemstellungen der Robotik anwendet. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der gleichzeitigen Ortung und Kartenerstellung mit Robotern, den sogenannten SLAM²⁴-Algorithmen.

In den DARPA Challenges stellte die Forschergruppe mit dem Stanford Racing Team die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeiten unter Beweis. Mit einem umgebauten VW Touareg namens Stanley (Abbildung 2.7) konnte das Team die Grand Challenge 2005 gewinnen (Thrun et al., 2006). Stanley legte die volle Renndistanz von knapp 213 km in weniger als

Sieger der zweiten
Grand Challenge

²³Die drei Schritte bestanden aus der Abtastung des Bildes, der Bestimmung der Krümmung des Fahrbahnverlaufes und der Abschätzung des Versatzes des Fahrzeugs von der Fahrbahnmitte (Pomerleau u. Jochem, 1996).

²⁴Simultaneous Localization and Mapping

sieben Stunden zurück und war damit das schnellste unter den fünf Fahrzeugen, die den kompletten Kurs autonom bewältigen konnten.

Während in den DARPA Grand Challenges der Schwerpunkt eher auf einer robusten Sensordatenfusion und einem zuverlässigen Wegpunktfolgeverhalten lag, galt es in der Urban Challenge 2007 ein umfangreiches Regelwerk zu beherrschen. Mit Junior, einem umgebauten VW Passat Variant TDI (Abbildung 2.7), war das Team der Stanford University auch in dem vorerst letzten Teil der Wettbewerbsreihe vertreten. Mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 22 km/h belegte das Fahrzeug nach einer nahezu fehlerfreien Fahrt hinter dem Konkurrenten von der Carnegie Mellon University den zweiten Platz.

Zweiter Platz in
der DARPA Urban
Challenge



Abbildung 2.7.: Stanfords fahrerlose Fahrzeuge für die DARPA Grand Challenge 2005 und die Urban Challenge 2007: Stanley (links) und Junior (rechts), Bildquellen: Darpa (2005) und Darpa (2009a)

2.2.8. California PATH²⁵-Programm, USA

Neben den von der DARPA organisierten Wettbewerben für unbemannte Fahrzeuge, die in Abschnitt 2.3 ausführlich beschrieben werden, gehört das California PATH-Programm zu den wichtigsten Forschungsprogrammen der Vereinigten Staaten, in dessen Rahmen auch an Systemen zur automatischen Fahrzeugführung geforscht wird. Das PATH-Programm wurde bereits 1986 mit dem Ziel gegründet, neue Technologien für die Bewältigung des steigenden kalifornischen Verkehrsaufkommens zu erforschen (Shladover, 1992). Unter der Verwaltung der University of California, Berkeley, in Zusammenarbeit mit dem California Department of Transportation²⁶, welches unter anderem auch das kalifornische Straßennetz aus High- und Freeways beaufsichtigt, wird in drei Teilberei-

Gründung bereits
1986

²⁵Partners for Advanced Transportation Technology

²⁶Caltrans, <http://www.dot.ca.gov/>

chen²⁷ an der Verbesserung des kalifornischen Verkehrssystems gearbeitet (California PATH, 2011).

Stützung der Fahrzeugpositionierung durch in die Straße eingebrachte Permanentmagnete

Ende der 1980er Jahre begann der Aufbau von Testfahrzeugen für die ersten Experimente zur automatischen Fahrzeugführung. Im Unterschied zu anderen Forschungsaktivitäten, die bordautonome Systeme realisierten, wurde die Fahrzeugpositionierung durch in die Straße eingebrachte Permanentmagnete gestützt. Die erste automatische Querführung wurde damit 1991 in einem Toyota Celica dargestellt, der mit einem elektrischen Stellantrieb für die Lenkung ausgerüstet war (Shladover, 2006).

Kooperatives Kolonnenfahren

Im Jahre 1989 wurden vier Testfahrzeuge mit einem Radarsensor, drahtloser Netzwerkkommunikation und mit Aktoren zur Betätigung von Gaspedal und Bremse zur Darstellung eines kooperativen Kolonnenfahrens ausgerüstet. Eine öffentliche Vorführung des Platoons aus vier Fahrzeugen wurde 1994 in San Diego auf dem Highway Interstate-15 gegeben.

In einer weiteren öffentlichkeitswirksamen Demonstration wurde 1997 erneut in San Diego ein automatisches Kolonnenfahren im Rahmen des NAHSC²⁸-Programms vorgeführt. Im Unterschied zur Demonstration von 1994 bestand das Platoon aus acht Fahrzeugen, die einander in kurzen Abständen folgten, wobei ein Fahrzeug zusätzlich einen automatischen Fahrstreifenwechsel vornahm und seine Position innerhalb der Kolonne wechselte.

In den Folgejahren wurden die Aktivitäten des automatischen Kolonnenfahrens auf Omnibusse und Lastkraftwagen ausgedehnt. Die Forschungsarbeiten dienen außerdem vielen weiteren Aktivitäten wie der Entwicklung von Kollisionswarnern, einer automatischen Schneepflügführung oder des präzisen Anfahrens von Bushaltestellen als Grundlage (Shladover, 2006).

2.2.9. Japanische Forschungsaktivitäten

Die bekanntesten Forschungsaktivitäten im Bereich der Automatisierung von Landfahrzeugen verteilen sich im japanischen Raum auf unterschiedliche Gruppen, die im Folgenden zusammengefasst sind.

²⁷Die drei Teilbereiche sind „Transportation Safety Research“, „Traffic Operations Research“ und „Modal Applications Research“.

²⁸National Automated Highway System Consortium, in das PATH im Vergleich zu den übrigen Partnern die größten Arbeitsumfänge einbrachte (Shladover, 2006)

Die Ursprünge der Forschungsarbeiten zur autonomen Fahrzeugführung reichen bis 1977 zurück, als am Tsukuba Mechanical Engineering Lab in Japan das erste autonome Fahrzeug weltweit entworfen wurde (Tsugawa et al., 1979). Ausgerüstet mit einem Kamerasystem, das weiße Fahrbahnmarkierungen in einer Entfernung von bis zu 50 m erkennen konnte, erreichte das Fahrzeug eine Geschwindigkeit von bis zu 30 km/h.

Erstes autonomes
Fahrzeug weltweit

Ende der 1980er Jahre entwickelte Nissan das sogenannte Personal Vehicle System auf Basis eines Kleinbusses, das in zwei verschiedenen Wahrnehmungsmodi autonome Fahrfunktionen ausführen konnte. Mit Hilfe von Ultraschallsensorik war das Fahrzeug in der Lage, entlang einer Leitplanke autonom zu fahren und dabei Hindernisse auf dem eigenen Fahrstreifen wahrzunehmen. Der zweite Modus basierte auf der maschinellen Wahrnehmung durch drei Videokameras, die das autonome Fahren entlang einer weißen Linie in einem Geschwindigkeitsbereich von bis zu 60 km/h ermöglichte (Taniguchi et al., 1991).

Als groß angelegtes Vorhaben wurde das Advanced Cruise-Assist Highway System²⁹ in den 1990er Jahren bekannt, das ähnliche Ansätze wie das California PATH-Programm verfolgte. In den drei Forschungsfeldern „providing information“, „vehicle control assistance“ und „fully automated driving“ wurden die Ziele verfolgt, die Anzahl an Verkehrsunfällen zu reduzieren, die Effizienz des Verkehrssystems zu steigern und den Fahrer bei seinen Fahraufgaben zu entlasten (Tsugawa, 1994; Kubota et al., 1999; AHS, 2011). 1996 wurde auf dem kurz vor der Eröffnung stehenden Joshinetsu Expressway ein automatisches Kolonnenfahren mit elf mit Radarsensoren ausgestatteten Fahrzeugen auf einer Streckenlänge von 11 km dargestellt. Die Demonstration beinhaltete Warnungen vor Gefahren, Kollisionsvermeidung, Spurhalten und automatisches Fahren. Im Unterschied zum bordautonomen Fahren standen entlang der Straße installierte LCX³⁰-Kabel als zusätzliche Hilfsmittel zur Verfügung. Insgesamt basierten die Fahrzeugfähigkeiten innerhalb des AHS auf umfangreichen Infrastrukturmaßnahmen und der Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur.

Automatisches Ko-
lonnenfahren auf
dem Joshinetsu
Expressway

Auch in den Folgejahren lag weiterhin ein Schwerpunkt der Arbeiten auf der Einbindung von Infrastrukturmaßnahmen. Unter dem Begriff „Smartway“ werden unter der Leitung des japanischen Ministeriums für

Einbindung von
Infrastruktur

²⁹ AHS

³⁰ Leaky Coaxial

Land, Infrastruktur, Transport und Tourismus seit August 2004 Konzepte für kooperative Fahrzeug-Highway-Systeme erarbeitet (Smartway, 2011).

Es ist bemerkenswert, dass sich trotz umfangreicher Forschungsaktivitäten in verschiedensten Bereichen der Robotik keine japanischen Teams bei den verschiedenen Wettbewerben der DARPA hervortaten.

2.3. Wettbewerbe für unbemannte Fahrzeuge

Die Forschung an autonomen Landfahrzeugen zeichnet sich nicht nur durch die dargestellten federführenden Gruppen, sondern auch durch eine Reihe bedeutender Wettbewerbe aus. Neben den weltweit beachteten DARPA Wettbewerben sind in diesem Zusammenhang auch die ELROB-Veranstaltungen zu nennen, die sich als europäische Leistungsschauen für Militärroboter etabliert haben.

2.3.1. DARPA Grand Challenges

Die durch die Technologieabteilung DARPA des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums gesponserten Wettbewerbe haben zum Ziel, die Entwicklung unbemannter Landfahrzeuge voranzutreiben. Nach einem Beschluss des amerikanischen Kongresses sollen bis zum Jahr 2015 ein Drittel der Fahrzeuge der amerikanischen Landstreitkräfte fahrerlos sein: „It shall be a goal of the Armed Forces to achieve the fielding of unmanned, remotely controlled technology such that. . . by 2015, one-third of the operational ground combat vehicles are unmanned“³¹ (Office, 2001). Auf dieser Basis konnte die DARPA Preisgelder in Millionenhöhe ausschreiben, um durch höhere Anreize die Entwicklung von unbemannten Fahrzeugen voranzutreiben.

Während bisherige Forschungsvorhaben meist einen rein kommerziellen oder einen ausschließlich akademischen Anspruch hatten, waren die Challenges die ersten Langstrecken-Wettbewerbe für autonome Fahrzeuge und haben sich damit als Triebfeder für die Weiterentwicklung von autonomen Systemen in immer komplexeren Einsatzumgebungen entwickelt. Die DARPA schaffte es durch professionell organisierte Wettbewerbe, die Erforschung autonomer Landfahrzeuge in den öffentlichen Fokus zu rücken.

Ziel: Bis 2015 ein
Drittel der Militär-
fahrzeuge fahrerlos

Wettbewerbe
der DARPA
als Triebfeder
der Forschung

³¹(Office, 2001), S. 38

Der erste Teil der Wettbewerbsreihe fand am 13. März 2004 im kalifornischen Barstow statt. Parallel zur Interstate 15 galt es, 150 Meilen auf nicht-öffentlichen Straßen durch die Mojave Wüste nach Primm unmittelbar hinter der Grenze zu Nevada autonom zu absolvieren. Das Fahrzeug, das als schnellstes die vorgegebene Strecke innerhalb von zehn Stunden bewältigen würde, sollte das Preisgeld in Höhe von einer Million Dollar gewinnen. Über 100 Teams hatten sich für die Teilnahme an dem Wettbewerb beworben, aber auf Basis eines Vorauswahlprozesses wurden lediglich 15 Teams für das Finale zugelassen. Unter technischen Gesichtspunkten ist die erste Grand Challenge als Misserfolg einzustufen, denn das erfolgreichste Fahrzeug konnte lediglich 7,4 Meilen autonom zurücklegen. Allerdings kann die erreichte Aufmerksamkeit durchaus als Erfolg gewertet werden.

Erste Grand Challenge durch die Wüste von Barstow nach Primm

Erfolgreichstes Fahrzeug kam nur 7,4 Meilen weit



Abbildung 2.8.: Carnegie Mellons Testträger H1ghlander bei der Durchquerung des sogenannten Beer Bottle Pass in der zweiten Grand Challenge, Bildquelle: Darpa (2005)

Die am 8. und 9. Oktober 2005 ebenfalls in der Mojave Wüste im US-Bundesstaat Nevada ausgerichtete zweite Grand Challenge war der erneute Versuch, die Wüste autonom zu durchqueren. Die 132,2 Meilen lange Strecke mit Start und Ziel in Primm enthielt drei enge Tunnel, über 100 scharfe Kurven und endete nach dem sogenannten Beer Bottle Pass (Abbildung 2.8). Neben einem verschärften Qualifikationsprozess erhöhte die DARPA das Preisgeld auf zwei Millionen Dollar. Von den ursprünglich 195 teilnehmenden Teams wurden nach Vorauswahl 43 zur Qualifikation für das Rennen eingeladen, von denen schließlich 23

Zweite Grand Challenge mit Start und Ziel in Primm

Fünf Fahrzeuge
bewältigten die
komplette Strecke

Teams zum Finale zugelassen wurden. Im Gegensatz zur ersten Grand Challenge schafften es beim zweiten Wettbewerb fünf Fahrzeuge, die komplette Strecke autonom zu befahren. Vier Teams konnten dabei das Zeitlimit von zehn Stunden einhalten. Sieger war Stanley von der Stanford University, der den Kurs in 6 Stunden, 53 Minuten und 58 Sekunden absolvierte und unterwegs den durch mechanische Probleme eingeschränkten zweitplatzierten H1ghlander von der Carnegie Mellon University überholte.

2.3.2. DARPA Urban Challenge 2007

Weitere Erhöhung
des Schwierig-
keitsgrades

Nachdem im zweiten DARPA Wettbewerb mehrere Roboterfahrzeuge gezeigt hatten, dass eine Durchquerung der Wüste auf unbefestigten Straßen autonom möglich ist, wurde mit Bekanntgabe der Urban Challenge der Schwierigkeitsgrad weiter erhöht. Im Vergleich zu früheren Szenarien auf Schnellstraßen oder zu den ersten beiden Grand Challenges umfasste die Urban Challenge eine deutlich vielfältigere Umgebung. Das bebaute Gebiet einer verlassenen Kaserne der ehemaligen George Air Force Base am Rande des kalifornischen Victorville gab dem dritten Wettbewerb den anspruchsvollen Rahmen. Die Roboterrennen durch

Verlassene Kaserne
diente als Rahmen



Abbildung 2.9.: Impressionen aus der Urban Challenge, Bildquelle: Darpa (2009a)

Forschungsschwer-
punkt lag auf den
Verhaltensfähigkei-
ten der Fahrzeuge

die Wüste waren für die Fahrzeuge physikalisch relativ anspruchsvoll, da es sich überwiegend um Fahrten auf unbefestigten Straßen handelte. Die Anforderungen an die Verhaltensfähigkeiten der Fahrzeuge waren allerdings begrenzt, denn es gab unter anderem keine Interaktion mit anderen Fahrzeugen. In der Urban Challenge lag der Schwerpunkt hingegen auf dem Verhaltensbereich, so dass neben der Einhaltung eines umfangreichen Verkehrsregelwerks auch das Erkennen von und der Umgang mit anderen fahrerlosen Fahrzeugen gefordert war. Die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern setzt voraus, Entscheidungen in Echtzeit basierend auf dem Verhalten des dynamischen Umfelds zu treffen. Eine

weitere Neuerung bestand in der Möglichkeit zur Vorab-Finanzierung durch die DARPA, so dass insgesamt elf sogenannte Track A Teams bis zu einer Million Dollar erhielten.

Der dritte Teil der Wettbewerbsreihe fand am 3. November 2007 statt. An die ersten drei Fahrzeuge, die einen Kurs von 60 Meilen in einer künstlichen städtischen Umgebung in weniger als sechs Stunden zurücklegten, wurde ein Preisgeld von insgesamt 3,5 Millionen Dollar vergeben. Gewinner war das Fahrzeug Boss der Carnegie Mellon University, Pittsburgh, das den Kurs am schnellsten und mit der geringsten Anzahl an Punktabzügen durch Regelverletzungen zurücklegen konnte. Abbildung 2.9 zeigt einige Impressionen aus der Urban Challenge.

Gewinner war das Team der Carnegie Mellon University

2.3.3. European Land-Robot Trial³²

Die ELROB-Veranstaltungen zur Robotererprobung sind keine Wettbewerbe im eigentlichen Sinne, wie es die DARPA Challenges darstellen. Vielmehr handelt es sich um eine Leistungsvorstellung der Fähigkeiten unbemannter Systeme in realistischen Szenarien und Umgebungen mit dem Ziel, die Forschung von Hochschule und Industrie mit den Nutzern militärischer Robotertechnologien zusammenzubringen.

Leistungsvorstellung unbemannter Systeme

Es wird unterschieden zwischen einer zivilen (C-ELROB³³) und einer militärischen Variante (M-ELROB³⁴), die jeweils alle zwei Jahre im Wechsel stattfindet. Während bei der militärischen Leistungsvorstellung das Militär als potenzieller Auftraggeber umworben wird und die Veranstaltung sich damit naturgemäß durch eine hohe Präsenz von Vertretern der Rüstungsindustrie auszeichnet, zieht die C-ELROB auch nicht-militärische Forschergruppen an. Ziel beider Veranstaltungen ist es, in ausgewählten Szenarien einen möglichst hohen Grad an Autonomie zu erreichen. Dadurch unterscheiden sie sich deutlich von den DARPA-Wettbewerben, die eine dauerhafte und vollständige autonome Fahrzeugführung erfordern.

Zivile und militärische Variante

Die erste militärische Austragung der Veranstaltungsreihe fand 2006 auf dem Truppenübungsplatz Hammelburg statt. Die Leistungsvorstellung umfasste Szenarien sowohl auf urbanem als auch auf unwegsamem Gelände mit starken Steigungen. Von den 18 teilnehmenden Teams kamen elf aus Deutschland. Im darauffolgenden Jahr fand erstmals die

³²ELROB

³³Civilian-ELROB

³⁴Military-ELROB

zivile ELROB statt, die auf einer Teststrecke der Schweizer Armee ausgetragen wurde. Die Veranstaltung machte deutlich, dass es inzwischen einige assistierende Systeme gibt, die eine Navigation auch auf schwierigem Gelände ermöglichen. Im Laufe der Jahre sind die Szenarien immer herausfordernder und vielfältiger geworden. In verschiedenen Kategorien wie „Überwachung und Aufklärung“ oder „Transport Konvoi“ stellen sich die teilnehmenden Teams den unterschiedlichen Anforderungen.

3 Team CarOLO in der DARPA Urban Challenge

Für die Teilnahme der Technischen Universität Braunschweig an der DARPA Urban Challenge wurde das Team CarOLO¹, bestehend aus Mitarbeitern von fünf Instituten der Fachbereiche Elektrotechnik, Informatik und Maschinenbau, gegründet. In eineinhalb Jahren entwickelte das Team den Versuchsträger namens Caroline auf Basis eines Volkswagen Passat Variant gemäß den Anforderungen des Wettbewerbs. Für eine Diskussion der Unterschiede zwischen dem Projekt Stadtpilot und der Urban Challenge sowie der daraus folgenden Ableitung der Anforderungen an das System zur autonomen Fahrzeugführung für den Braunschweiger Stadtring ist es notwendig, den Wettbewerb im Detail zu betrachten. In den folgenden Abschnitten werden daher das Regelwerk, die daraus abgeleiteten Anforderungen an das Fahrzeugsystem sowie der Wettbewerbsverlauf beschrieben. Abschließend erfolgt eine Zusammenstellung der wichtigsten Ereignisse von Carolines Weg im Finale aus Sicht des Teams CarOLO.

Caroline als
Beitrag der TU
Braunschweig

3.1. Wettbewerbsanforderungen

3.1.1. Regelwerk

Durch ein umfangreiches Regelwerk, das sich weitestgehend an den kalifornischen Verkehrsregeln orientierte, wurden die Anforderungen des Wettbewerbs genau definiert. Die wichtigsten Vorgaben sind im Folgenden kurz zusammengefasst (Darpa, 2009b,c):

Kalifornische
Verkehrsregeln
als Grundlage

- Eine grundlegende Voraussetzung für die Wettbewerbsteilnahme ist die Auslegung der Testträger als automatische Fahrzeuge, so dass Informationen über das Umfeld nur durch Bordsensorik oder öffentlich zugängliche Signale wie GPS² empfangen werden. Da ein

¹Der Name CarOLO ist angelehnt an den Namen „Carolo-Wilhelmina“ der Technischen Universität Braunschweig.

²Global Positioning System

Sicherheitsfahrer nicht erlaubt ist, der im Fehlerfall in die Fahrzeugführung eingreift, erhält jedes Fahrzeug eine fernbedienbare Notaus-Einheit.

- Eine Mission basiert auf sogenannten Checkpunkten, die die Fahrzeuge in einer gegebenen Reihenfolge zu erreichen haben. Es besteht die Vorgabe, dass die Fahrzeuge innerhalb von fünf Minuten nach Bekanntgabe einer Mission in der Lage sind, die Fahraufgabe zu beginnen.
- Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist durch in einer Karte hinterlegte Geschwindigkeitsbegrenzungen beschränkt und der aktuellen Situation anzupassen, um ein dauerhaft sicheres Fahrverhalten zu gewährleisten. Bei Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug ist ein Mindestabstand einzuhalten.
- Sowohl befestigte als auch kurze unbefestigte Strecken erfordern auch dann eine sichere Navigation, wenn die GPS-Wegpunkte³ ungenau und im großen Abstand positioniert sind. Auch in Gebieten ohne GPS-Verfügbarkeit ist ein sicheres Navigieren zu gewährleisten.
- Das sogenannte „Check-and-Go“-Verhalten stellt die Grundlage des Fahrzeugverhaltens dar und beschreibt eine vorsichtige Fahrweise. Ist beispielsweise beim Passieren eines statischen Hindernisses das Verlassen des eigenen Fahrstreifens erforderlich, verlangt dies zunächst ein vollständiges Stoppen vor dem Hindernis, um die Situation grundlegend zu analysieren und abschließend zu durchfahren.
- Sogenannte T-Kreuzungen, an denen der kreuzende Verkehr vorfahrtsberechtigt ist, erfordern nach einem Stopp an der Haltlinie das Einfädeln in den fließenden Verkehr. Auch sogenannte Four-Way-Stops, bei denen die Fahrzeuge in der Reihenfolge ihres Annäherns an die Kreuzung Vorfahrt haben, gehören zu den typischen Verkehrssituationen. Dies beinhaltet auch ein Aufreihen an Kreuzungen, sofern andere Fahrzeuge direkt vor dem eigenen Fahrzeug die Kreuzung anfahren.

Befestigte und
unbefestigte
Abschnitte

Kreuzungs-
situationen
als besondere
Herausforderung

³Die durch die DARPA bereitgestellte digitale Karte des Geländes bestand aus sogenannten GPS-Wegpunkten, die das Straßennetz beschreiben.

- Auf sogenannten Freifahrtsflächen, wie beispielsweise Parkplätzen, haben die Fahrzeuge auch dann ein sicheres Verhalten zu zeigen, wenn nur wenige oder gar keine GPS-Wegpunkte vorliegen und sich feste statische Hindernisse auf der befahrbaren Fläche befinden. Einparken in eine vordefinierte Parklücke gehört zu den erforderlichen Fähigkeiten.
- Blockierte oder unpassierbare Straßen sind durch die Sensorik verlässlich zu erkennen. Im Regelfall folgt daraus ein dynamisches Umpflanen der Route und damit zunächst ein mehrzügiges Wendemanöver.

Neben den dargestellten Anforderungen wurden einige Situationen wie die Erkennung von Lichtsignalanlagen und Straßenschildern sowie der Umgang mit Fußgängern bereits im Vorfeld ausgeschlossen. Das Regelwerk beschränkt sich ausschließlich auf stadtähnliche Rahmenbedingungen, so dass der Umgang mit Autobahnsituationen und erschwerten oder umfangreichen Passagen auf unbefestigtem Gelände nicht Teil der Vorgaben war.

3.1.2. Abgeleitete Systemanforderungen

Auch wenn das Regelwerk Spielraum für Interpretationen ließ, konnten aus den definierten Regeln genaue Anforderungen für das Fahrzeug Caroline abgeleitet werden, von denen einige im Folgenden zusammengestellt sind:

- Die Anforderung einer autonomen Fahrt verlangt die vollständig elektronische Ansteuerung von Lenkaktuator, Gas-, Bremspedal und Getriebe. Als einziges Kommunikationssignal darf auf das öffentlich zugängliche GPS-Signal zurückgegriffen werden. Zur Umfeldwahrnehmung ist nur bordeigene Sensorik erlaubt.
- Da es keine Möglichkeit zur Überwachung durch einen menschlichen Sicherheitsfahrer gibt, ist eine sehr hohe Robustheit des Systems notwendig. Eine fahrzeuginterne Eigenüberwachung ermöglicht bei einer Fehlfunktion automatische Hilfsmaßnahmen zur Wiederherstellung eines fehlerfreien Betriebs.
- Die Missionsvorgaben in Weltkoordinaten erfordern eine globale Eigenpositionierung. Da nicht garantiert ist, dass die Wegpunkte grundsätzlich hochgenau vermessen sind, wird zusätzlich eine

Vollständig
elektronische
Ansteuerung

Eigenüberwachung

GPS-basierte
Fahrzeugführung

Stützung durch die maschinelle Wahrnehmung in Form einer Fahrbereichserkennung notwendig. Eine hochgenaue Positionierung und Fahrstreifenzuordnung ist aufgrund der nur spärlich vorhandenen Fahrstreifenmarkierungen allerdings über eine Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen nur bedingt möglich, so dass ein sogenanntes Differential-GPS Anwendung findet, um eine absolute Positioniergenauigkeit im Submeterbereich zu erreichen.

Strategische
Missionsplanung

- Ähnlich der Funktionalität von Navigationssystemen wird gefordert, dass das System zur autonomen Fahrzeugführung in der Lage ist, die optimale Route zum Erreichen des Missionsziels zu ermitteln. Besondere Situationen wie blockierte Straßen oder un-erreichbare Wegpunkte erfordern ein dynamisches Umlanen der Route.

360°-Sensor-
abdeckung

- Zur Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern und für den Umgang mit diversen Arten von statischen Hindernissen wird ein System zur maschinellen Wahrnehmung benötigt, das sowohl bewegte als auch stationäre Objekte erfasst. Es ist nicht ausreichend, eine rein relativ zu anderen Objekten basierte Wahrnehmung zu verwenden, da die strategische Planung die Kenntnis der Absolutposition der umgebenden Objekte benötigt. Die Erkennung blockierter Straßen erfordert beispielsweise den Abgleich mit einer digitalen Karte über eine GPS-basierte Positionsbestimmung. Parkmanöver benötigen im Nahbereich möglichst eine 360°-Sensorabdeckung, aber auch darüber hinaus eine großflächige Abdeckung von Mittel- und Fernbereich.

3.2. Wettbewerbsverlauf und Ergebnisse

36 der 89
Teilnehmer
qualifizieren sich
für das Halbfinale

Von ursprünglich 89 teilnehmenden Teams konnten sich 53 für das SiteVisit genannte Viertelfinale qualifizieren. Auf Basis dieses Auswahlprozesses, bei dem Mitarbeiter der DARPA erstmals die Fähigkeiten der einzelnen Fahrzeuge begutachteten, wurden die Halbfinalisten bestimmt: Am 9. August 2007 gab die DARPA bekannt, dass 36 Teams zum Halbfinale NQE⁴ nach Victorville eingeladen sind. Über mehrere Tage wurden die Fahrzeuge im Rahmen des Halbfinals intensiv von den Juroren begutachtet. Ursprünglich sollten zwanzig Fahrzeuge im Finale

⁴National Qualification Event

gegeneinander antreten, allerdings wurden aufgrund der Ergebnisse im Halbfinale nur elf Teams zugelassen.

Das Finale am 3. November 2007 bestand aus drei verschiedenen Missionen, die innerhalb des Zeitlimits von sechs Stunden zu erfüllen waren. Auf Basis der tatsächlich benötigten Zeit und zusätzlicher Bonus- und Strafpunkte für z.B. übermäßig lange Verzögerungen, Regelverstöße oder gefährliches Verhalten wurde eine Gesamtpunktzahl der einzelnen Finalisten ermittelt. Gewinner war das Fahrzeug Boss der Carnegie Mellon University vor den Fahrzeugen der Stanford University (Stanford Racing Team), dem Virginia Tech (Team VictorTango) und dem Massachusetts Institute of Technology (Team MIT). Zwei weitere Teams (Ben Franklin Racing, Cornell) konnten den Kurs vollenden, blieben allerdings nicht im vorgegebenen Zeitlimit von sechs Stunden.

Nur elf
Teilnehmer am
Finale

3.2.1. Wettbewerbsverlauf des Teams CarOLO

Auf Basis eines Volkswagen Passat Variant begannen im Juni 2006 die Arbeiten des interdisziplinären Teams der Technischen Universität Braunschweig für die Teilnahme am Urban Challenge Wettbewerb. Es galt, innerhalb von weniger als eineinhalb Jahren ein vollständig autonomes Straßenfahrzeug entsprechend dem DARPA Reglement aufzubauen. Abbildung 3.1 illustriert den Zeitplan zum Aufbau des Testträgers Caroline.

Aufbau eines
interdisziplinären
Teams

Bereits im Dezember 2006 konnten mit dem Versuchsfahrzeug erste autonome Fahrversuche durchgeführt werden, nachdem die elektronische Ansteuerung und Regelung des Systems umgesetzt war. Im März 2007 fand der erste offizielle Meilenstein des Bewerbungsprozesses statt, bei dem das Fahrzeug in einer Videodemonstration erste grundlegende Fähigkeiten wie das Umfahren eines statischen Hindernisses auf der eigenen Fahrbahn zeigte. Die Videodemonstration diente als Instrument der DARPA zur Vorauswahl zum SiteVisit, zu dem das Team CarOLO aufgrund seiner erfolgreichen Darstellung eingeladen wurde. Laut DARPA-Regularien fand dieses Viertelfinale auf amerikanischem Boden statt, so dass sich das Kernteam mit dem Fahrzeug gemeinsam für einige Wochen am South West Research Institute in San Antonio, Texas, niederließ. In mehreren Prüfungen hatte Caroline zu zeigen, dass sie Kreuzungssituationen beherrschen, mehrstufige Wendemanöver vornehmen und parkende Fahrzeuge umfahren kann.

Erste autonome
Fahrversuche im
Dezember 2006

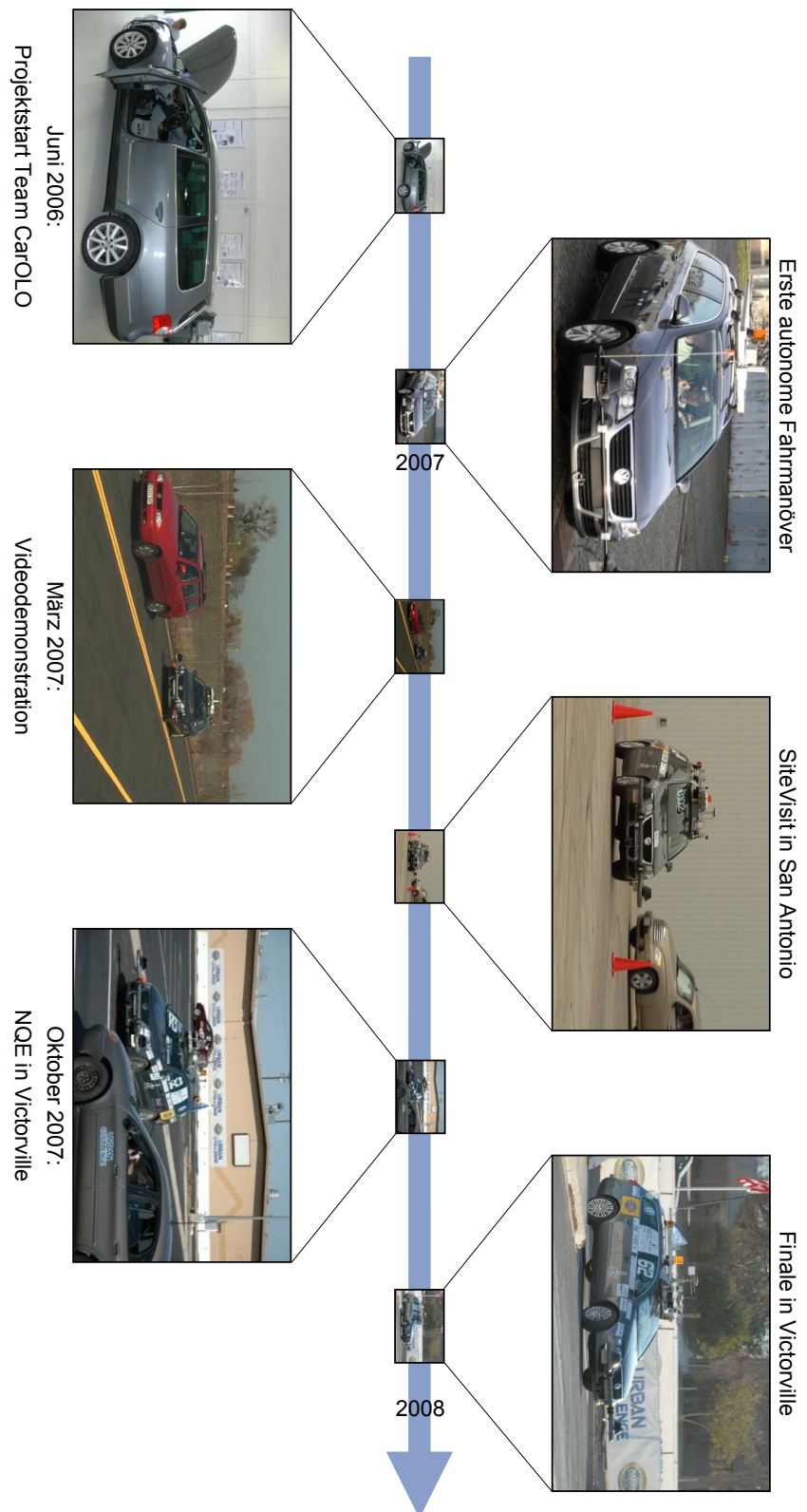


Abbildung 3.1.: Zeitplan zur Entwicklung von Caroline

Aufgrund der bestandenen Prüfung im SiteVisit qualifizierte sich das Team für die Teilnahme am Halbfinale NQE. Auf drei verschiedenen Kursen A, B und C wurden die Fahrzeuge über mehrere Tage auf das komplette DARPA-Reglement hin geprüft. Während auf dem Kurs A die Fähigkeiten der Fahrzeuge zur Interaktion mit fließendem Verkehr abgeprüft wurden, diente Kurs B dazu, das Leistungsvermögen der Fahrzeuge zur grundlegenden Navigation, zum Umfahren statischer Hindernisse und zur Durchführung von Parkmanövern zu testen. Der dritte Parcours stellte in erster Linie Kreuzungssituationen dar, bei denen die Fahrzeuge auf ihr Verhalten an den amerikanischen Four-Way-Stops getestet wurden. Abbildung 3.2 zeigt Szenen aus den drei verschiedenen Qualifikationsläufen. Caroline konnte sich nach bestandener Prüfung als eines von elf Teams für das Finale der Urban Challenge qualifizieren.

Bestandener
SiteVisit in
San Antonio

Caroline im Finale



Abbildung 3.2.: Szenen aus den drei verschiedenen Kursen des National Qualification Events: Kurse A, B und C (von links)

Im Finale kam es zu einer bisher nie dagewesenen Situation, denn bislang waren die übrigen Verkehrsteilnehmer ausschließlich Testfahrer. Nun aber fuhren stattdessen alle Wettbewerbsfahrzeuge gleichzeitig auf der Teststrecke, so dass es zu Interaktionen zwischen den Roboterfahrzeugen kam. Jeder autonome Versuchsträger wurde zusätzlich von einem Überwachungsfahrzeug der DARPA begleitet, das über eine Funkverbindung die Roboter in den sicheren Zustand eines Nothalts überführen konnte. Während des Wettbewerbs gab es mehrere Pausen für das gesamte Teilnehmerfeld, um Unfälle oder entstandene Staus aufzulösen.

Interaktion
verschiedener
Roboter war
ein Novum

Das Finale war in drei verschiedene Missionen untergliedert, die nur durch einen kurzen Zwischenstopp zum Einspielen der neuen Aufgaben unterbrochen waren. In dieser kurzen Unterbrechung bestand jedoch keine Möglichkeit zur Anpassung des Systems. Abbildung 3.3 zeigt das vollständige Straßennetz, das für die Missionen zur Verfügung stand. Es besteht aus einem Startbereich mit anschließendem Kreisverkehr im Südwesten des Gebietes, einem zentralen Kerngebiet mit einer großen

Finale bestand aus
drei Teilmissionen

Anzahl an Kreuzungen, einer langen Straße mit zwei Fahrstreifen im Osten, kurzen unbefestigten Straßenabschnitten sowie einem großen Parkplatz für die Darstellung von Parksituationen im Nordwesten.

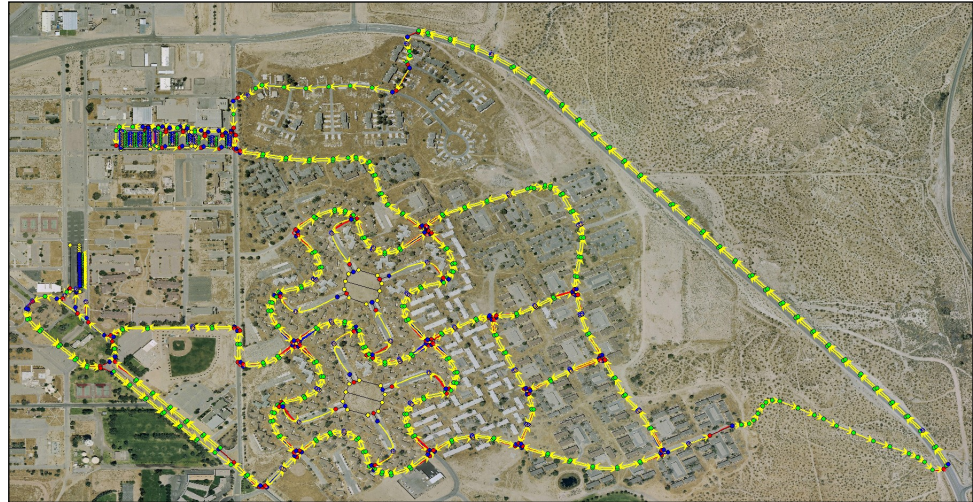


Abbildung 3.3.: Verfügbares Straßennetz im Finale.

Caroline
konnte 16,4
Kilometer
autonom
bewältigen

Caroline zeigte auf langen Passagen ein nahezu fehlerfreies Verhalten. Die insgesamt zurückgelegte Strecke von 16,4 Kilometern wurde allerdings durch vier besondere Ereignisse unterbrochen, die im Folgenden genauer beschrieben werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang vor allem das auffällig kreative Verhalten des Versuchsträgers, das sich auf der einen Seite durch die Fähigkeit zur Lösung unvorhergesehener Probleme auszeichnete. Andererseits führte diese Eigenschaft auch zu teilweise nicht deterministischem und nicht regelkonformem Verhalten.

Abschnitt I: Festgefahren im Sand

<i>Rahmendaten:</i>	
Start:	7:27 Uhr
Ende:	~ 7:52 Uhr
Dauer:	~ 25 min
Länge:	2,5 km
v_{mittel} :	6 km/h

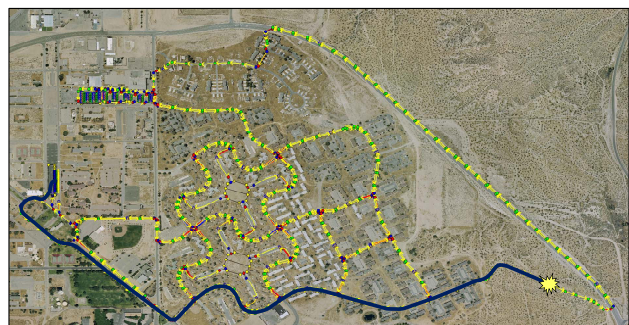


Tabelle 3.1.: Rahmendaten und Kursverlauf des ersten Abschnitts.

Der Start in das Finale der Urban Challenge begann für Caroline um 7:27 Uhr kalifornischer Ortszeit (UTC⁵-8). Nach dem Verlassen des Startbereichs und der Durchquerung des Kreisverkehrs fuhr Caroline im Süden entlang des Straßennetzes. Im Südosten des Parcours durchquerte der Testträger wie vorgesehen eine Offroad-Passage, die sich durch eine unbefestigte, abfallende Straße auszeichnete. Nachdem der Beginn dieser Passage noch erfolgreich absolviert worden war, näherte sich Caroline einem DARPA-Begleitfahrzeug eines vorausfahrenden Mitbewerbers, der aufgrund technischer Schwierigkeiten eine Rückstausituation verursachte. Da Carolines Weiterfahrt nicht durch ihr Begleitfahrzeug unterbrochen wurde, setzte ihr Fahrentscheidermodul zu einem Ausweichmanöver an, so dass Caroline von der Fahrbahn abkam (Abbildung 3.4). Da es sich auch aus der Perspektive der DARPA um eher unübliche Umstände handelte, durfte Caroline aus der Situation befreit werden und die Fahrt fortsetzen.

Start um 7:27 Uhr

Abkommen von
der Fahrbahn nach
unerwartetem
Verkehrsrückstau

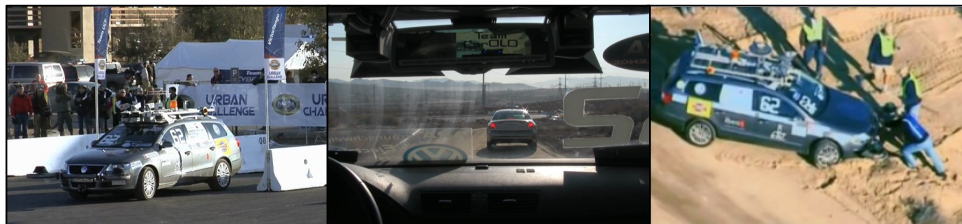


Abbildung 3.4.: Szenen aus dem Finale.

Bereits zu diesem Zeitpunkt zeigte sich eine besondere Eigenschaft von Caroline. Die in vielen Fällen sehr hilfreiche Kreativität des Fahrentscheidermoduls führte in dieser Situation zu einem nicht gewünschten Verhalten, denn das Straßennetz sah ein Überholen eines anderen Fahrzeugs auf diesem Teilstück des Kurses nicht vor. Das beschriebene Verhalten liegt in der Wahl eines Fahrentscheideransatzes begründet, welcher an den DAMN⁶-Ansatz angelehnt ist und die explizite Abbildung von Regeln im System nicht vorsieht. Stattdessen ergibt sich aus der Kombination verschiedener Verhalten eine implizite Abbildung von Regeln wie das Vermeiden von Hindernissen durch ein hohes abstoßendes Potenzial (Rosenblatt, 1997; Rauskolb et al., 2008).

⁵Universal Time Coordinated

⁶Distributed Architecture for Mobile Navigation

Abschnitt II: Planungsfehler des Fahrentscheiders

<i>Rahmendaten:</i>	
Start:	8:17 Uhr
Ende:	9:08 Uhr
Dauer:	51 min
Länge:	5,9 km
v_{mittel} :	6,95 km/h

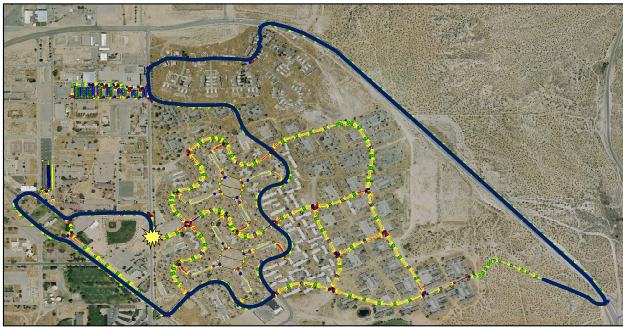


Tabelle 3.2.: Rahmendaten und Kursverlauf des zweiten Abschnitts

Fortsetzen der
Fahrt um 8:17 Uhr

Verpasstes
Abbiegemanöver
führt zu einer
Route durch abge-
sperrtes Gelände

Gegen 8:17 Uhr konnte Caroline die Fahrt fortsetzen und passierte zunächst die Schnellstraße mit zwei Fahrstreifen am östlichen Rand des Straßennetzes. Nach dem Durchqueren des Kerngebietes mit diversen Kreuzungssituationen und der erneuten Durchfahrt des Kreisverkehrs folgte eine weitere sehr interessante Situation. An einer Kreuzung, an der nur ein Linksabbiegen möglich war, kam es zu einem Fehlverhalten des Entscheidermoduls. Da das Abbiegemanöver verpasst wurde, entschied sich Caroline zu einer Geradeausfahrt in südlicher Richtung, obwohl dies nicht Teil des zur Verfügung stehenden Straßennetzes war und mehrere versetzt angeordnete Barrieren eine Durchquerung eigentlich nur für menschliche Fahrer ermöglichen sollte. Der Versuchsträger ließ sich durch die Absperrung jedoch nicht irritieren und bahnte sich autonom den Weg in südlicher Richtung zurück aufs Straßennetz. Während sich in dieser Situation sowohl das Geschick des Fahrentscheidersystems zeigte, eine Fahrt auf unbekanntem Gebiet zu bewältigen und damit auch die Leistungsfähigkeit der Wahrnehmung unterstrich, handelte es sich allerdings auch unter diesen Gegebenheiten um ein nicht regelkonformes Verhalten. Die Fahrt auf dieser im System nicht dokumentierten Straße war nicht vorgesehen.

Abschnitt III: Missachtete Vorfahrtsberechtigung

Missachtung der
Vorfahrtsregeln
um 9:20 Uhr

Um 9:20 Uhr kam es schließlich zu einem von außen als schwerwiegend zu wertenden Fehlverhalten. An der Kreuzung zur Parkplatzeinfahrt wartete das Fahrzeug des MIT-Teams vorfahrtsberechtigt, wurde jedoch von Caroline fälschlicherweise ignoriert. Durch das Eingreifen der Be-

gleitfahrzeuge wurde die kritische Situation unterbunden und konnte manuell aufgelöst werden.

<i>Rahmendaten:</i>	
Start:	9:08 Uhr
Ende:	9:20 Uhr
Dauer:	12 min
Länge:	3 km
v_{mittel} :	15 km/h

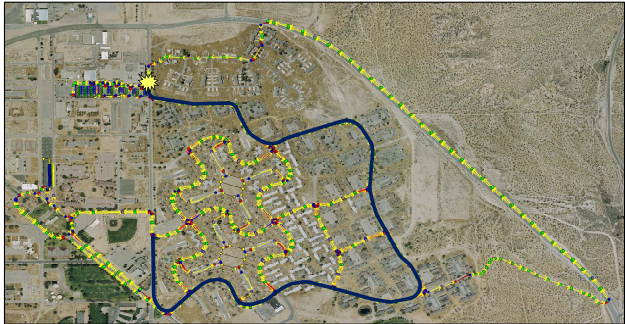


Tabelle 3.3.: Rahmendaten und Kursverlauf des dritten Abschnitts

Wie Untersuchungen im Nachgang der Challenge gezeigt haben, lag das Fehlverhalten in dieser Situation allerdings nicht an mangelnden Systemfähigkeiten. Stattdessen war beim manuellen Nachbearbeiten des durch die DARPA gestellten Kartenmaterials ein Fehler unterlaufen, so dass Carolines Fahrentscheidersystem nicht von einer Vorfahrtskreuzung ausgehen konnte. Die Situation war dem System damit nicht erschließbar, erschien von außen betrachtet allerdings wie ein grobes Fehlverhalten der Wahrnehmungs- und Entscheidungsmodule.

Ursache war ein fehlerhaftes Kartenmaterial

Abschnitt IV: Wettbewerbsende

<i>Rahmendaten:</i>	
Start:	~ 9:25 Uhr
Ende:	9:55 Uhr
Dauer:	30 min
Länge:	5 km
v_{mittel} :	10 km/h

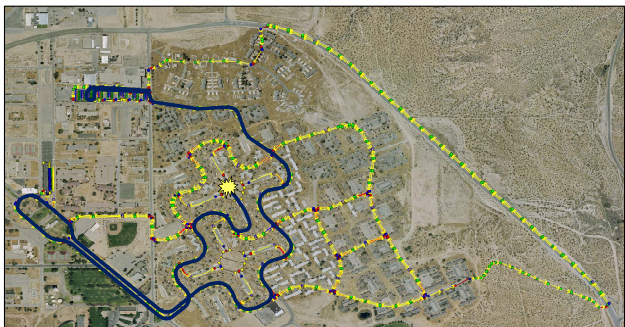


Tabelle 3.4.: Rahmendaten und Kursverlauf des vierten Abschnitts

Die Fahrt konnte schließlich fortgesetzt werden, so dass Caroline zunächst um 9:25 Uhr die Navigation in der Parkzone absolvierte, das Straßennetz und den Kreisverkehr erneut durchquerte und schließlich um 9:52 Uhr die Freifahrtszone erreichte. Die Log-Dateien des Systems deuten auf größere Schwierigkeiten des Fahrentscheidermoduls hin, in dem die erlaubte

Wiederaufnahme der Fahrt um 9:25 Uhr

Leichte Kollision
mit dem MIT-
Fahrzeug in einer
Freifahrtszone

Zykluszeit des Prozesses mehrfach überschritten wurde und in mehreren durch das Sicherheitssystem erzwungenen Neustarts resultierte. Ein Neustart des Fahrentscheiders führte allerdings auch dazu, dass die Routine zur Behandlung von Freifahrtszonen beendet wurde. Mit dem Ziel, diese Zone nun möglichst direkt zu verlassen, traf Caroline erneut auf das mittlerweile auch in der Freifahrtsfläche befindliche MIT-Fahrzeug. Bei der Annäherung beider Fahrzeuge setzte keines zum Ausweichen an, so dass es zu einer leichten Kollision der Versuchsträger kam. Aufgrund einer leicht verbogenen Sensorik (Abbildung 3.5) wurde Caroline aus dem Rennen genommen.



Abbildung 3.5.: Wettbewerbsende

Caroline absolvierte insgesamt 16,4 km der Gesamtstrecke und pasierte dabei 524 Wegpunkte und 13 vorgegebene Checkpunkte⁷. Auf dieser Strecke kam es zu insgesamt 65 Kreuzungssituationen. Neben den dargestellten besonderen Situationen zeigen die Protokolldateien des Rennens mehrere Rechnerausfälle, die allerdings eigenständig durch das fahrzeugeigene Überwachungssystem bewältigt wurden. Dies unterstreicht einmal mehr die Notwendigkeit von überwachenden Prozessen für das Gesamtsystem. Zwar vollendete Caroline das Finale nicht, war allerdings das Fahrzeug, das als letztes durch die DARPA aus dem Rennen genommen wurde. Insgesamt nur sechs Fahrzeuge absolvierten das Finale vollständig.

3.2.2. Lessons Learned

Die Teilnahme an einem Wettbewerb wie der Urban Challenge ist in vielerlei Hinsicht durch einige Besonderheiten gekennzeichnet, von denen im Folgenden einige kurz hervorgehoben werden.

- Der Wettkampfcharakter ist für die Teammitglieder höchst motivierend, da ein externer, nicht beeinflussbarer Zeitplan keine

⁷Während Wegpunkte allgemein das Straßennetz beschrieben, wurde die Mission über Checkpunkte definiert.

Anpassungen an den tatsächlichen technischen Fortschritt erlaubt. Andererseits erfordert der hohe Zeitdruck eine sehr starke Priorisierung, so dass gewisse technische Umsetzungen nur unvollständig erfolgen konnten. Im Sinne einer langfristigen Forschung ist die Wahrung der Nachhaltigkeit eine große Herausforderung und wird teilweise erst nach Abschluss eines solchen Wettbewerbs sichergestellt.

Wettbewerb
schafft besonde-
ren Charakter

- Der Interpretationsspielraum im Regelwerk erfordert ein sehr sorgfältiges Anforderungsmanagement, denn eine Fehlinterpretation bestimmter Wettbewerbsvorgaben führt schnell zu technischen Fehlentwicklungen. Beispielsweise wurde eine Erkennung von Fahrstreifenmarkierungen zur Stützung der Navigation entwickelt, deren Einsatz aufgrund sehr spärlich vorhandener Markierungen nicht sinnvoll war. Für zukünftige Systeme ist eine Fokussierung auf die wesentlichen Anforderungen anzustreben, wobei dem Anforderungsmanagement eine entscheidende Bedeutung zukommt.
- Da Eingriffe durch den Menschen nicht erlaubt waren, hat es sich als sehr sinnvoll erwiesen, einen überwachenden Prozess im System zu etablieren, der sowohl die Hardware als auch die Software betrachtet. Im Fehlerfall konnte der sogenannte Watchdog einzelne Softwareteile, Rechneinheiten oder Sensorsteuergeräte neu starten. Auch in zukünftigen autonomen Systemen ist eine derart überwachende Einheit grundsätzlich zu empfehlen.
- Der Testträger Caroline war mit einer Vielzahl an zusätzlichen technischen Geräten ausgestattet. Als Folge konnten aufgrund einer negativen Energiebilanz nicht alle entwickelten Systeme im Finale verwendet werden. Für eine neue Generation an Testträgern ist daher entweder der Einbau einer zusätzlichen Energiequelle (zweite Lichtmaschine, Generator) oder der Einsatz von verbrauchsarmer Elektronik zu fordern.
- Das Urban Challenge Fahrzeug Caroline zeichnete sich durch die Fähigkeit aus, unvorhergesehene, nicht explizit im System abgebildete Szenen zu beherrschen. Diese Eigenschaft führte andererseits aber zu teilweise nicht deterministischem und nicht regelkonformem Verhalten. Auch bei der Übertragung eines Systems zur Entscheidungsfindung und -umsetzung in eine reale städtische Umgebung

Sorgfältiges
Management der
Anforderungen
erforderlich

Eigenüberwachung
des Systems not-
wendig

Wahrung einer
positiven
Energiebilanz

Neue Ansätze zur
Fahrzeugführung
notwendig

mit nicht-kooperativen Verkehrsteilnehmern ist die Befähigung zur generalisierten Beherrschung von Fahrszenen von großem Vorteil. Zugleich sind die Anforderungen an Vorhersagbarkeit allerdings ungleich höher und erfordern daher neue Ansätze zur autonomen Fahrzeugführung.

Die gesammelten Erfahrungen des Teams CarOLO werden mit dem Projekt Stadtpilot in die Umgebung des Braunschweiger Stadtrings überführt. Das Vorhaben ist im folgenden Abschnitt ausführlich beschrieben.

TEIL II: PROJEKT STADTPILOT

Der zweite Teil dieser Dissertation beschreibt die aktuellen Arbeiten an der Technischen Universität Braunschweig im Forschungsbereich autonomer Straßenfahrzeuge im Rahmen der Stadtpilot-Aktivitäten. Durch die Übertragung der in der Urban Challenge aufgebauten Kompetenzen in eine reale städtische Umgebung werden autonome Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring realisiert.

4 Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring

Übertragung der Urban-Challenge-Erfahrung auf eine reale städtische Umgebung

Die Forschergruppe der Technischen Universität Braunschweig hat durch die Teilnahme mit dem Versuchsträger Caroline an der DARPA Urban Challenge gezeigt, dass sie in der Lage ist, prototypisch ein autonomes Straßenfahrzeug auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik zu entwickeln. Aufbauend auf diesen Kompetenzen ist das Projekt Stadtpilot mit dem Ziel entstanden, eine autonome Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring zu realisieren. Während die Urban Challenge eine künstliche, stark vereinfachte städtische Umgebung darstellte, wird mit dem Stadtpilot-Projekt autonomes Fahren in einer realen städtischen Umgebung erforscht und stellt damit den nächsten Schritt im Forschungsbereich der autonomen Straßenfahrzeuge dar. Die Fahrt auf dieser Straße des Braunschweiger Stadtverkehrs mit je zwei Fahrstreifen pro Richtung erfordert unter anderem die Interaktion mit einer Vielfalt von unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern, autonome Fahrstreifenwechsel und den Umgang mit Lichtsignalanlagen. Im Vergleich zu anderen innerstädtischen Verkehrsszenarien handelt es sich dabei aber noch um eine strukturierte Umgebung.

Viele neue, bisher unerforschte Situationen

Die folgenden Abschnitte beschreiben ausführlich die Aktivitäten der Technischen Universität Braunschweig im Forschungsprojekt Stadtpilot. Im Rahmen dieser Vorstellung wird auch diskutiert, inwiefern das Vorhaben den nächsten Schritt auf Basis der Urban-Challenge-Erfahrung darstellt. Nicht alle Situationen im gesamten Szenario zeichnen sich dabei durch einen höheren Komplexitätsgrad aus, sondern stellen neue, größtenteils bisher unerforschte Situationen dar. Im Unterschied zur Urban Challenge, in der die Versuchsträger exakt für den Anwendungsfall des einmaligen Wettbewerbs konzipiert waren, ist das Projekt Stadtpilot als langfristiges Forschungsvorhaben angesetzt. Im Vordergrund steht die Wiederverwertbarkeit der Forschungsergebnisse. Neben den Rahmenbedingungen und Szenarien werden daher in den folgenden Abschnitten auch die wissenschaftlichen Ziele des Projekts näher erläutert.

4.1. Projektrahmen

Das Ziel des Projekts ist die autonome Fahrt unter realen Verkehrsbedingungen auf dem Braunschweiger Stadtring. Dabei handelt es sich um eine teilweise baulich getrennte Straße mit mehreren Fahrstreifen um das Innenstadtgebiet von Braunschweig, die mit bis zu 27.000 Fahrzeugen je Fahrtrichtung und Tag zu den zentralen innerstädtischen Verkehrsadern der Stadt gehört (Stadt Braunschweig, 2011). Mit je zwei Fahrstreifen pro Richtung sowie zusätzlichen Abbiegefahrstreifen an den Kreuzungen zeigen die Bilder in Grafik 4.1 zwei typische Situationen auf dem Braunschweiger Stadtring. Auf einer Kurslänge von ungefähr elf Kilometern Länge gilt es, mit unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern wie PKW-, LKW- oder Motorradfahrern in einem Geschwindigkeitsbereich bis ungefähr 60 km/h im realen Verkehr autonom zu fahren.

Kurslänge von elf
Kilometern



Abbildung 4.1.: Typische Verkehrsszenen des Braunschweiger Stadtrings

Ein Team mit Forschern aus drei verschiedenen Instituten stellt sich der Herausforderung des Stadtring-Szenarios. Am Standort Wolfsburg des Niedersächsischen Forschungszentrums für Fahrzeugtechnik werden dazu zwei Fahrzeuge mit den Namen Henry und Leonie aufgebaut. Die Namensgebung orientiert sich an dem berühmten Herzog von Braunschweig Heinrich der Löwe¹ (Henry the Lion).

Team aus drei
Instituten

Henry und Leonie

4.2. Szenarien

In verschiedenen Szenarien wird die autonome Fahrt in der Umgebung des Braunschweiger Stadtrings erforscht. Während das Fernziel des Projekts

¹Heinrich der Löwe aus dem Geschlecht der Welfen, geboren 1129/31 in Ravensburg am Bodensee, gehört zu den herausragenden Persönlichkeiten des Hochmittelalters. Von 1142 bis 1180 war er als Heinrich III. der Herzog von Sachsen, von 1156 bis 1180 als Heinrich XII. der Herzog von Bayern. Diese Stellung wird als königsgleich charakterisiert. Er starb am 6. August 1195 in Braunschweig (Luckhardt u. Niehoff, 1995).

Kontinuierlicher
Ausbau der Fahr-
zeugfähigkeiten

die vollständige autonome Umrundung der Braunschweiger Innenstadt auf dem Stadtring vorsieht und die Fahrzeugfähigkeiten dahingehend kontinuierlich erweitert werden, erfolgen die ersten autonomen Fahrten auf einem Teilstück im Nordosten des Stadtrings. Abbildung 4.2 zeigt eine Karte des Ringgebietes und die jeweils beabsichtigte Route.



Abbildung 4.2.: Karte des Braunschweiger Stadtgebiets und ausgewählter Abschnitt für die erste autonome Fahrt, die rote Linie markiert die jeweils beabsichtigte Route. Kartendaten CCBYSA 2012 OpenStreet-Map.org contributors

4.2.1. Umrundung der Innenstadt auf dem Braunschweiger Stadtring

Für eine vollständige Umrundung der Innenstadt auf dem Stadtring benötigt ein autonomes Straßenfahrzeug diverse Fähigkeiten, wie das Einhalten des eigenen Fahrstreifens, die Durchführung von Fahrstreifenwechseln und das regelkonforme Verhalten an Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen und mehreren Fahrstreifen. Das Szenario sieht zunächst das Ausparken vom Seitenstreifen und Einfädeln in den fließenden Verkehr am Haus der Elektrotechnik vor. An der Kreuzung zum Hagenring erfolgt dann der Übergang zum Stadtring. Nach einer längeren Passage der Folgefahrt in westliche Richtung mit diversen Fahrstreifenwechseln kommt es am Cyriaksring im Südwesten des Stadtrings zu einem ersten automatischen Abbiegen. Nach der Vorbeifahrt am Braunschweiger Hauptbahnhof ist es letztlich das Ziel, zum Haus der Elektrotechnik zurückzukehren und auf dem anliegenden Parkplatz ein Parkmanöver vorzunehmen.

Fernziel:
Umrundung der
Innenstadt

4.2.2. Auftaktszenario im Nordosten des Stadtrings

Die ersten autonomen Fahrten erfolgen auf einem ausgewählten Abschnitt im Nordosten des Stadtringgebietes. Die Strecke zwischen dem Haus der Elektrotechnik und dem Studentenwohnheim an der Hamburger Straße erweist sich als repräsentativ für die gesamte Stadtringumgebung mit zwei Einschränkungen. Zum einen erfordert dieses Szenario noch keine Abbiegevorgänge an großen Kreuzungen mit der Herausforderung, Querverkehr verlässlich wahrzunehmen. Zum anderen sind die GPS-Abschattungen durch Bäume und Häuser begrenzt, so dass keine Stützung der Positionierung des Fahrzeugs durch Landmarken erforderlich ist. Von diesen Einschränkungen abgesehen, werden für dieses Teilstück alle auch für die übrige Stadtringumgebung erforderlichen Fähigkeiten benötigt. Der ausgewählte Abschnitt ist als Schleife ausgelegt, so dass es möglich ist, die Strecke in unmittelbarer Abfolge durch Wendemanöver mehrfach zu durchfahren. Tabelle 4.1 fasst einige statistische Daten des Auftaktszenarios in der Stadtring-Umgebung zusammen. Die im Folgenden hervorgehobenen Abschnitte (Abbildung 4.3) stellen eine Auswahl besonderer Szenen auf dem Teilstück des Stadtrings dar.

Erste autonome Fahrten im Nordosten des Stadtrings

Teilstück umfasst keine Abbiegevorgänge

Mehrfache ununterbrochene Abfahrt des Teilstücks möglich

Tabelle 4.1.: Statistische Daten des Szenarios

<i>Kategorie</i>	<i>Detail</i>	<i>Kennzahl</i>
Kreuzungssituationen	mit Lichtsignalanlagen	9
	ohne Lichtsignalanlagen	3
Fahrstreifenwechsel	notwendig	0
	situationsabhängig sinnvoll	2
180°-Wendemanöver	automatisiert	1
	nur manuell möglich	1 ^a
Breite der Fahrstreifen	Wertebereich	2,64 - 3,67 m
	Durchschnitt	3,11 m
Kurvenkrümmung	Wertebereich	0 - 0,5449 1/m
	Durchschnitt	0,0063 1/m
Kurslänge	Gesamtkurs	2,5 km

^aEs handelt sich um das Wendemanöver vor dem Haus der Elektrotechnik. Aufgrund der begrenzten Verkehrsfläche für den Wendevorgang ist in Abhängigkeit der Verkehrssituation ein Wendemanöver nur durch ein Zurücksetzen möglich. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit stand ein solcher Modus im autonomen Fahrbetrieb allerdings noch nicht zur Verfügung.



Szene I:

Start am Haus der
Elektrotechnik

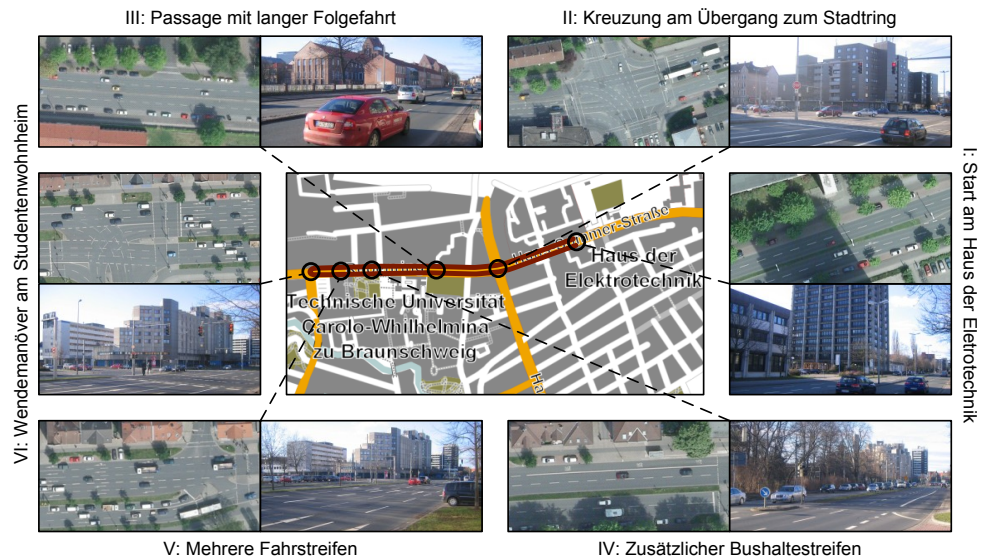


Abbildung 4.3.: Besondere Situationen des Auftaktszenarios, Luftbilder: ©Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation (NR. 011/2010), Kartendaten CCBYSA 2012 OpenStreetMap.org contributors.



Szene II:

Kreuzung am
Übergang zum
Stadtring



Szene III:

Lange Folgefahrt



Szene IV:

Zusätzlicher
Fahrstreifen

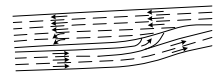
Ein situationsgerechtes Annähern und Überqueren der ersten Kreuzungen erfordert besondere Fähigkeiten. Neben der Berücksichtigung von Lichtsignalanlagen ist der Umgang mit besonders starken Geschwindigkeitsänderungen der Verkehrsteilnehmer gefordert. Der Anhaltvorgang vieler Verkehrsteilnehmer nach dem Ende einer Grünphase beinhaltet sehr hohe Verzögerungen bis hin zu einer Vollbremsung. Auch in diesen Situationen ist ein Folgeverhalten der Testträger regelkonform und komfortabel zu realisieren.

Es folgt das nächste Teilstück mit einer langen Passage der Folgefahrt. Neben dem Einhalten des Fahrstreifens und dem Durchführen von Fahrstreifenwechseln ist eine möglichst hohe Geschwindigkeit bei gleichzeitiger Berücksichtigung des vorausfahrenden Fahrzeugs einzustellen. Ziel ist ein regelkonformes, dem Umfeld angepasstes Verhalten im Verkehrsfluss. Im weiteren Verlauf wird die Infrastruktur zunehmend vielfältiger. Zunächst geht eine Bushaltestelle in einen zusätzlichen Fahrstreifenwechsel über. Dies erfordert eine Repräsentation der Fahrstreifen im System

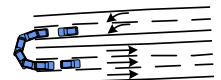
sowie den Umgang mit Linienbussen bei der Ein- und Ausfahrt in die Bushaltestelle.

Die Kreuzung am Studentenwohnheim im Westen des Teilabschnittes umfasst insgesamt acht Fahrstreifen. In westlicher Richtung werden aus den ursprünglich zwei Fahrstreifen insgesamt drei für den fließenden Geradeausverkehr, zwei dienen den Linksabbiegern. In Gegenrichtung befinden sich insgesamt drei Fahrstreifen. Ein elektronisches Abbild dieser komplexen Fahrstreifensituation ist Grundlage für regelkonforme Abbiegemanöver und Fahrstreifenwechsel.

Die Kreuzung am Studentenwohnheim bietet sich für ein automatisches Wendemanöver an. Neben dem Umgang mit den Phasen der Lichtsignalanlagen ist an dieser Stelle besondere Vorsicht mit den Fußgängern gefordert, die auf der Gegenseite die Fahrbahn vorfahrtsberechtigt überqueren.



Szene V:
Komplexe Fahr-
streifensituation



Szene VI:
Wendemanöver am
Studentenwohn-
heim

4.3. Wissenschaftliche Herausforderungen

Das Stadtpilot-Projekt verfolgt in erster Linie die Umsetzung herausfordernder wissenschaftlicher Ziele. Einige Forschungsthemen werden im Folgenden formuliert.

Umfeldwahrnehmung: Die Grundlage der Systemfunktion autonomer Straßenfahrzeuge und von Fahrerassistenzsystemen bildet die maschinelle Wahrnehmung und Beschreibung des Fahrzeugumfelds. Im Rahmen des Projekts Stadtpilot werden dabei sowohl gitterbasierte als auch objektbasierte Ansätze erforscht. Die belegungsgitterbasierte Darstellung der Umgebung enthält idealerweise alle statischen Objekte, während das Objektmodell das dynamische Umfeld beschreibt (Effertz, 2009). Unter diesen Gesichtspunkten kommt der Dynamikklassifikation eine besonders wichtige Bedeutung zu, über die die Einordnung von Sensordaten in die unterschiedlichen Modelle zur Umfeldbeschreibung erfolgt.

Die Echtzeitanforderungen sind im Vergleich zu bisherigen Szenarien aufgrund der hohen Dynamik des realen städtischen Verkehrs erheblich gestiegen. Die teilweise sehr hohen Verzögerungen anderer Verkehrsteilnehmer, beispielsweise beim Annähern an eine Lichtsignalanlage, sowie die Reaktion auf Ein- und Ausscherer erfordern eine schnelle und zuverlässige maschinelle Wahrnehmung im Nahbereich.

Belegungsgitter-
basierte und
objektbasierte
Darstellung des
Umfelds

Lichtsignalanlagen

Der Verkehrsfluss auf dem Stadtring wird durch Lichtsignalanlagen gesteuert. Das aktuelle Signalbild ist eine für das Fahrzeugverhalten zentrale Information, die entweder durch die maschinelle Wahrnehmung oder durch eine Kommunikationseinrichtung zu erfassen ist.

Neben der eigentlichen maschinellen Wahrnehmung ist es auch von zunehmender Bedeutung, die Qualität der Daten zu bewerten. Erst damit wird es möglich, die Grenzen des Systems zu beurteilen und eine abgestufte Reduzierung der Fahrfähigkeiten zu erreichen. Ziel der Forschung sind daher Wahrnehmungssysteme, deren Qualität über Bewertungskonzepte beurteilt wird.

Situations-
spezifische Art
der Entschei-
dungsfindung

Fahrzeugführung: In der Urban Challenge hat sich der Testträger Caroline durch ein in einigen Situationen besonderes Verhalten ausgezeichnet. Wie in Abschnitt 3.2.1 bereits dargestellt, zeigte das System zur Bestimmung von Fahrentscheidungen von Caroline teilweise einen besonderen, kreativen Charakter. Während es auf der einen Seite damit Situationen auflösen konnte, die im System nicht explizit vorgesehen waren, bedeutete dies auf der anderen Seite allerdings auch, dass sich das System nicht immer völlig regelkonform verhielt. Für eine Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring ist es aber sehr wichtig, ein deterministisches, regelkonformes Entscheidungssystem zu entwickeln. Trotzdem ist es vor allem in nicht durch das interne Regelsystem abgebildeten Situationen von Vorteil, einen Teil dieser Kreativität zu erhalten, sofern das regelkonforme Verhalten des Fahrzeugs sichergestellt werden kann. Der sinnvollen Kombination von regel- und verhaltensbasierten Ansätzen und der Umschaltung zwischen den Verfahren kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Diese Kombination wirkt sich auch auf die Umsetzung von Fahrentscheidungen aus. Es wird ein System benötigt, das unabhängig vom gewählten Ansatz der Entscheidungsfindung manöverübergreifend ein optimiertes und sicheres Fahrverhalten ermöglicht. Ziel ist ein flexibles System zur optimierten Realisierung von Fahrentscheidungen. Neben dem Fahrentscheider ist daher ein neuartiges Verfahren zur manöverübergreifenden Planung von Trajektorien Teil eines mehrstufigen Prozesses zur Fahrzeugführung. Besonders die Forschungsergebnisse in diesem Bereich werden im Rahmen dieser Dissertation ausführlich vorgestellt.

Ortung: Eine hochpräzise Bestimmung des Eigenzustands mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich ist eine im Stadtverkehr bisher ungelöste Aufgabe. Eine hochgenaue und integere Ortung, die rein auf GPS und Korrekturdaten aufsetzt, ist aufgrund von Abschattungen durch Häuser, Bäume und Brücken bislang nicht mit dieser Genauigkeit möglich. Daher wird im Projekt die Stützung der Daten mit Informationen aus Kartenmaterial, Fahrstreifenmarkierungen und Landmarken erforscht (Sasse et al., 2009). In diesem Zusammenhang ist auch die SLAM²-Technik sehr interessant, bei der gleichzeitig mit der Bestimmung der eigenen Position eine digitale Karte aufgebaut bzw. verbessert wird (Durrant-Whyte u. Bailey, 2006).

Stützung der
Ortung durch
Landmarken

Sicherheitskonzept: Zur Gewährleistung der Sicherheit des eigenen Fahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer wird aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems ein ausgereiftes Sicherheitskonzept benötigt. Das Sicherheitssystem bewertet die aktuelle Güte des Gesamtsystems, um daraus geeignete Maßnahmen abzuleiten und dem Erreichen von kritischen Zuständen vorzubeugen. Eine zentrale Frage ist dabei auch, wie im Falle von Störungen ein sicherer Zustand erreicht wird.

Gewährleistung
eines sicheren
Betriebs durch
umfangreiches
Sicherheitskonzept

Simulation und Test: Im Automobilbau ist seit langem ein Trend zu erkennen, dass die Entwicklung verstärkt durch die Unterstützung von Simulationswerkzeugen stattfindet und die dadurch gewonnenen Ergebnisse erst verhältnismäßig spät im realen Testversuch verifiziert werden. Dieser Trend gilt auch für elektronische Fahrzeugsysteme. Entsprechend erfolgen auch bei der Entwicklung der autonomen Fahrfähigkeiten diverse entwicklungsbegleitende Tests, die zum Teil durch eine Verkehrssimulation unterstützt werden. Einen Grundansatz zur Testfallerzeugung stellt die systematische Gliederung in einzelne kritische Verkehrsszenarien auf Basis eines Unfalltypenkatalogs der Versicherer dar (Saust et al., 2009).

Entwicklungs-
begleitende Tests
und Einsatz von
Simulationstools

²Simultaneous localization and mapping

4.4. Gegenüberstellung mit der DARPA Urban Challenge

Urban Challenge

Mit dem folgenden Abschnitt wird eine Frage aus dem Auditorium der IAS-Konferenz³ 2008 in Baden-Baden aufgegriffen⁴. Die Frage lautete, inwiefern sich die definierten Szenarien des Stadtpilot-Projekts wissenschaftlich von denen der DARPA Urban Challenge unterscheiden. Da dies in der Tat eine sehr wichtige Fragestellung ist, werden im Folgenden die Unterschiede in vier verschiedenen Kategorien ausführlich erläutert. Nicht alle Situationen zeichnen sich lediglich durch einen höheren Schwierigkeitsgrad aus, sondern stellen vielmehr neue, bisher mit autonomen Straßenfahrzeugen unbehandelte Stadtszenarien dar.

4.4.1. Neue Rahmenbedingungen

In der Urban Challenge, die als dritter Teil der DARPA Grand Challenges als einmaliger Wettbewerb konzipiert war, galt es, eine Siebprämie zu gewinnen bzw. eine möglichst gute Platzierung im Vergleich zu den Wettbewerbern zu erreichen (Abbildung 4.4). Die Fahrzeuge wurden exakt für diesen Anwendungsfall entwickelt und unter großem Zeitdruck erfüllten notfalls auch unvollkommene Lösungen ihren Zweck. Im Versuchsträger Caroline konnten aufgrund einer negativen Energiebilanz beispielsweise nicht alle Systeme im Wettbewerb eingesetzt werden. Im Vergleich ist das Projekt Stadtpilot als langfristiges Forschungsvorhaben angesetzt. Dies hat aber auch zur Folge, dass sich die Umsetzung einer Lösung aus wissenschaftlichen Gründen verzögert, um die Nachhaltigkeit im Sinne der Forschung dauerhaft sicher zu stellen.

Langfristigkeit
vs. einmaliger
Wettbewerb



Abbildung 4.4.: Eindrücke aus der Urban Challenge zur Verdeutlichung der Rahmenbedingungen

³10th International Conference on Intelligent Autonomous Systems

⁴Frage aus dem Auditorium im Rahmen des Urban Challenge Workshops am 23. Juli 2008

Während es sich in der Challenge um einen künstlichen, durch Stuntfahrer generierten Verkehr auf einem abgesperrten, nicht-öffentlichen Gelände handelte, sind die Stadtpilot-Szenarien Teil des öffentlichen Straßenverkehrs mit realem, unbeeinflusstem Verkehrsaufkommen. Das Fahrzeugverhalten hat sich nicht mehr am DARPA-Reglement, sondern an der Straßenverkehrsordnung zu orientieren.

Öffentliches vs.
abgesperrtes
Gelände

Nach Artikel 8 des internationalen Übereinkommens über den Straßenverkehr ist eine autonome Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr zunächst nicht vorgesehen. Die Vorgaben des Übereinkommens in Bezug auf das Forschungsvorhaben lauten gemäß Artikel 8 (Inland Transport Committee, 1968):

Straßenverkehrs-
ordnung vs.
DARPA Reglement

„(1) Jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge müssen, wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben.”

...

„(5) Jeder Führer muss dauernd sein Fahrzeug beherrschen oder seine Tiere führen können.”⁵

Unter der Auflage eines ausgereiften Sicherheitskonzepts (Reschka et al., 2010) in Kombination mit einem geschulten Fahrer sind derartige Fahrten im Rahmen des Forschungsprojekts Stadtpilot allerdings möglich. Dazu konnte Mitte Juli 2010 eine Ausnahmegenehmigung des Landes Niedersachsen für die autonomen Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring erwirkt werden. Auf Basis eines Gutachtens des TÜV NORD Mobilität, in dem das Fahrzeug umfassend auf Straßentauglichkeit geprüft wurde, ist der autonome Fahrbetrieb auf öffentlichen Straßen erlaubt. Bei allen Tests und Versuchsfahrten schreibt die Genehmigung die Überwachung durch einen Sicherheitsfahrer vor, der im Notfall in die Fahrzeugführung eingreift. Zumindest für das Forschungsprojekt Stadtpilot konnte damit die rechtliche Fragestellung gelöst werden. Eine Übertragung auf den allgemeinen Fall der fahrerlosen Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr ist allerdings nicht gegeben.

Ausnahme-
genehmigung des
Landes Niedersach-
sen

Auch wenn das autonome Fahren für den Großserieneinsatz vorerst noch eine Vision bleibt, erarbeiten bereits einige Automobilhersteller entsprechende Konzepte. Mit den Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung im allgemeinen Fall beschäftigt sich daher die „Projektgruppe Automatisierung” unter der Moderation der Bundesanstalt für Straßenwesen⁶ gemeinsam mit Experten der Automobil- und Zulieferer-

⁵(Inland Transport Committee, 1968), S. 11

⁶BAST

industrie, sowie Hochschulen und Rechtsanwälten (BAST, 2009; Gasser, 2009, 2010).

4.4.2. Vielfältigere Infrastruktur

Die Infrastrukturbedingungen im Stadtgebiet Braunschweigs sind aufgrund der realen Gegebenheiten deutlich vielfältiger (Abbildung 4.5). Das stillgelegte Kasernengelände der Urban Challenge wird durch die stark besiedelte Umgebung des Stadtringumfeldes ersetzt. Einerseits fallen damit die aus dem Wettbewerb bekannten unbefestigten Straßen weg, andererseits führt die dichte Bebauung zu besonders hohen Anforderungen an die Ortung. Während in der Urban Challenge eine Ortung auf Basis einer mit einem DGPS-Empfänger gekoppelten Trägheitsplattform ausreichte, um sich fahrstreifengenau auf der Fahrbahn zu positionieren, ist für das reale Stadtszenario an vielen Stellen eine zusätzliche Stützung durch erkannte Fahrstreifen und Landmarken erforderlich.

Stützung über
Landmarken
vs. idealer
GPS-Empfang



Abbildung 4.5.: Infrastruktur in der Urban Challenge (links) und auf dem Stadtring (Mitte, rechts)

Die Abschattung durch Häuser und über die Straße ragende Bäume und Straßenschilder führt in weiten Bereichen zu wechselnd sichtbaren Satellitenkonstellationen, so dass die GPS-Ortung in Kombination mit RTK⁷- Korrekturdaten nicht durchgehend gesichert ist. Selbst mit diesen hochgenauen Korrekturdaten, die im stationären Fall eine Ortung im Zentimeterbereich erlauben, ist eine Positionierung in einen Fahrstreifen hinein aufgrund der schmalen Fahrstreifenbreiten im Vergleich zur Urban Challenge nicht garantiert. Abbildung 4.6 zeigt die Anzahl an sichtbaren Satelliten während einer Messfahrt auf dem Stadtring. Während zu Beginn der Messung die Anzahl an Satelliten für eine Positionierung ausreichend ist, reduziert sie sich im Verlauf der Messung zu lediglich einem verfügbaren Satelliten. Das Resultat ist eine deutlich

⁷Real-Time-Kinematik

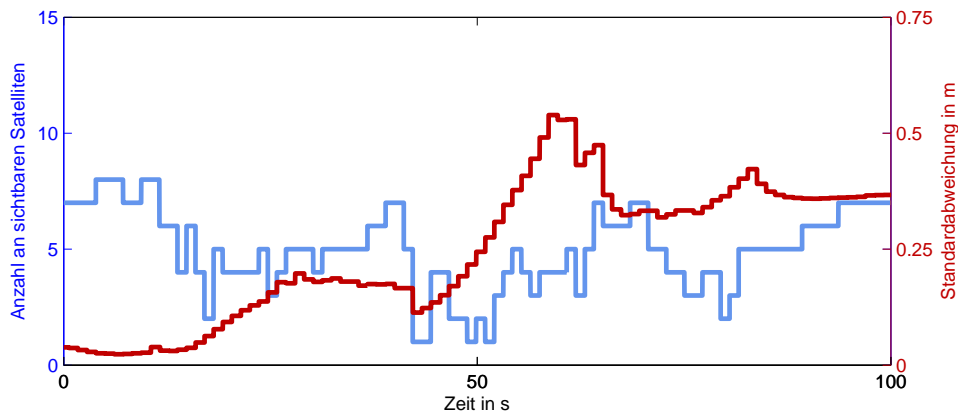


Abbildung 4.6.: Typische Satellitensichtbarkeit bei einer Messfahrt auf dem östlichen Braunschweiger Stadtring, Abschnitt zwischen dem Braunschweiger Hauptbahnhof Richtung Norden bis zum Hagenring, die Aufzeichnung erfolgte am 16.9.2011 um 10:27 Uhr

erhöhte Standardabweichung, so dass eine hochgenaue Positionierung allein mit DGPS-Daten nicht möglich ist.

Die Abbildung 4.7 verdeutlicht die gestiegenen Anforderungen an die Präzision. Während die Umgebung der Urban Challenge derart präpariert wurde, dass ein Fehlverhalten der Fahrzeuge ohne größere Folgen blieb, ist die Infrastruktur der Stadtringumgebung weniger fehlertolerant. Bereits ein kurzes Verlassen der Fahrbahngrenzen über den Bordstein hinweg kann im öffentlichen Straßenverkehr nicht toleriert werden. Daher ist ein hohes Maß an die Präzision aller beteiligten Module gefordert.

Hohe Präzision
vs. fehlertolerante
Infrastruktur

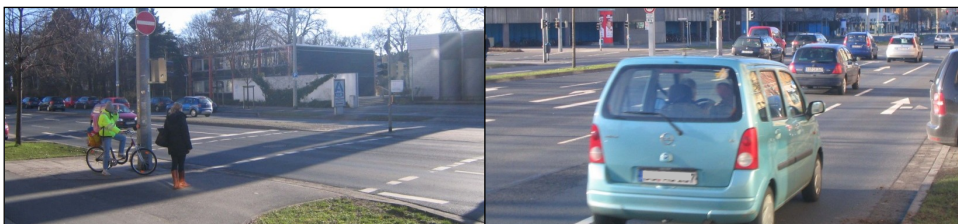


Abbildung 4.7.: Beispielszenen vom Stadtring, die die erforderliche Präzision verdeutlichen

Die meisten Kreuzungssituationen auf dem Stadtring sind mit Lichtsignalanlagen ausgestattet, die den Verkehrsfluss regeln. Die Zustände der Lichtsignalanlagen sind eine wichtige Informationsquelle für die Entscheidungseinheit und haben Einfluss auf das Verhalten des Testträgers. Den amerikanischen Verkehrsregeln entsprechend waren demgegenüber alle Kreuzungssituationen in der Urban Challenge als sogenannte 4-Way-

Lichtsignalanlagen
vs. 4-Way-Stops

Stops und T-Kreuzungen ausgelegt, bei denen über die Stoppzeichen die Vorfahrtsregeln gesetzt wurden. Die Stoppzeichen mussten nicht von den Fahrzeugen erkannt werden, sondern waren in einer digitalen Karte hinterlegt.

Notwendige
Fahrstreifenwechsel
vs. blockierte
Straßen

Eine spezielle Herausforderung des Wettbewerbs war das notwendige Erkennen von vollständig blockierten Straßen, die ein dynamisches Neuplanen der Route und ein sofortiges mehrstufiges Wendemanöver erforderten. Derartige Situationen sind nicht Teil der natürlichen Stadtringumgebung. Stattdessen treten neue herausfordernde Situationen wie z.B. notwendige Fahrstreifenwechsel auf, um ein Abbiegemanöver an einer der nächsten Kreuzungen vorzunehmen. Sofern der umgebende Verkehr durch ein unkooperatives Verhalten des Verkehrs einen solchen Fahrstreifenwechsel erschwert, wird die Situation besonders herausfordernd.

4.4.3. Vielfältigere Umfeldbedingungen

Reales Verkehrsaufkommen vs.
gesteuerter
Verkehr

Neben einer vielfältigeren Infrastruktur sind auch die Herausforderungen im Umgang mit dem Umfeld gestiegen (Abbildung 4.8). Die Bedingungen im Wettbewerb waren komplett durch die DARPA beeinflusst: Das Umfeld bestand ausschließlich aus Autos und statischen Hindernissen, der gesteuerte Verkehr zeichnete sich vor allem durch das defensive Fahrverhalten der simulierenden Stuntfahrer der DARPA aus. Daraus leitete sich auch eine vollständig eigenverantwortliche Geschwindigkeitswahl der Roboterfahrzeuge ab. Obwohl durchgehend eine Höchstgeschwindigkeit von 30 mph durch das Reglement erlaubt war, erreichten auch die Siegerteams diese Maximalgeschwindigkeit nur äußerst selten. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten aller Wettbewerbsteilnehmer waren erheblich geringer und selbst der Versuchsträger Boss erreichte als Sieger nur eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 14 mph. Eine Abschätzung der Fähigkeiten des Caroline-Systems führte sogar zu einer internen Begrenzung der Maximalgeschwindigkeit auf 20 mph.

Verkehrsfluss vs.
eigenständige Geschwindigkeitswahl

Der Stadtpilot gibt im Vergleich veränderte Umfeldbedingungen vor: Der Verkehr ist wesentlich dichter, die Zeitlücken erheblich kleiner und das Fahrverhalten der übrigen Verkehrsteilnehmer ist teilweise nicht kooperativ. Es gilt, sich in einem Umfeld aus vielfältigen Verkehrsteilnehmern mit sehr unterschiedlichen Fahrstilen sowie einem realen Verkehrsaufkommen regelkonform zu verhalten. Das Geschwindigkeitsprofil ergibt



Abbildung 4.8.: Umfeld in der Urban Challenge (links) und auf dem Stadtring (rechts)

sich damit auch aus dem Verkehrsfluss, so dass Verkehrsbehinderungen durch eine zu konservative Geschwindigkeitswahl ausgeschlossen werden.

Ein bisher weltweit einmaliges Ereignis war im Finale der Urban Challenge am 3. November 2007 die Interaktion von mehreren Roboter-Fahrzeugen in einer stadtähnlichen Umgebung. Damals waren alle Finalisten zeitgleich auf der Strecke unterwegs, um ihre Missionen zu erfüllen. Dabei kam es unter anderem auch zum ersten Stau autonomer Fahrzeuge, als ein Finalteilnehmer aufgrund technischer Schwierigkeiten an einer Kreuzung ein Hindernis darstellte. Das eigentlich Besondere beim Zusammentreffen mehrerer Roboter ist das notwendige interagierende Verhalten. Während sich die Stuntfahrer zur Simulation des umgebenen Verkehrs durch ein äußerst vorhersagbares, defensives Verhalten auszeichneten, waren die Roboter derart programmiert, dass sie im Falle unvorhergesehener Situationen auch Regelverstöße in Betracht zogen. Verzögert sich beispielsweise die Weiterfahrt eines vorfahrtsberechtigten Testträgers an einer Kreuzung übermäßig lange, ist eine Missachtung der Vorfahrtsregel durch die übrigen Fahrzeuge in Betracht zu ziehen, um die eigene Weiterfahrt nicht zu gefährden.

Vielfältige Fahr-
stile vs. defensive
Stuntfahrer

Diese kleineren Regelverstöße sind im realen Straßenverkehr hingegen alltäglich. Ein kurzes Überschreiten des eigenen Fahrstreifens in Form einer kleinen Ausweichbewegung in den Nachbarfahrstreifen, ein nicht-gesetzter Blinker bei Fahrstreifenwechseln oder Fußgänger, die unerlaubt bei roter Ampelphase die Straße überqueren, sind Situationen, mit denen Fahrzeugführer im realen Straßenverkehr umzugehen haben. Insofern ist auch im Projekt Stadtpilot ein solches Verhalten abzubilden und stellt damit zwangsläufig höhere Anforderungen an die Verhaltensfähigkeiten der Stadtpilot-Fahrzeuge. Im Unterschied zur Urban Challenge wird nicht mehr von einem hauptsächlich defensiven, prognostizierbaren Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer ausgegangen.

4.4.4. Gestiegene Versuchsträgeranforderungen



Abbildung 4.9.: Beispiele für erlaubte Fahrzeugmodifikationen in der Urban Challenge

Fahrzeugkontur
vs. beliebige
Fahrzeugmodi-
fikationen

Das DARPA Reglement erlaubte nahezu beliebige Fahrzeugmodifikationen. Abbildung 4.9 zeigt den Versuchsträger Dexter des Teams Case (Case Western Reserve University), der nur noch wenige Gemeinsamkeiten mit einem normalen Serienfahrzeug hat. Auch der Testträger Caroline zeigt durch die sehr ausfallend montierten Laserscanner vor dem Fahrzeug den Spielraum, den die DARPA beim Fahrzeugaufbau zuließ. Aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen im öffentlichen Straßenverkehr sind die erlaubten Maßnahmen sehr beschränkt. Die Sensorik des Testträgers Leonie darf die Kontur des Fahrzeugs in Form der Fahrzeugsilhouette nicht überragen und kann deshalb nur einen vergleichsweise eingeschränkten Erfassungsbereich erreichen.

Eigenüberwachung
vs. externes
Notaussystem

Zwingende Voraussetzung für eine Teilnahme an der Urban Challenge war ein fernbedienbares Notaussystem, um die Fahrzeuge im Fehlerfall in einen definierten sicheren Zustand zu überführen. Zwei unterschiedliche Modi des sicheren Zustands waren vorgesehen. Der sogenannte Pause-Modus versetzte das Fahrzeug bei laufendem Motor in einen Standby-Betrieb und konnte jederzeit zurück in den vollständig autonomen Modus überführt werden. Zur zusätzlichen Absicherung besteht die Möglichkeit, das Fahrzeug über eine automatische Abschaltung des Motors dauerhaft stillzulegen. Ein erneutes Aktivieren kann nur im Fahrzeug selbst geschehen.

Ein derartiges Überwachungssystem ist in den Stadtpilot-Testträgern nicht notwendig, da ein überwachender Sicherheitsfahrer darauf geschult ist, im Fehlerfall die Fahrzeugführung zu übernehmen. Es besteht die Möglichkeit, Lenkrad, Gas- und Bremspedal jederzeit zu übersteuern, was zu einem sofortigen Abbruch des autonomen Fahrbetriebs führt. Diverse Notausschalter sorgen für weitere Eingriffsmöglichkeiten. Im Rahmen eines weiterführenden Sicherheitskonzepts wird der Sicherheitsfahrer

jederzeit über die Güte und den Zustand des Systems informiert und auf eventuelle Fehlfunktionen hingewiesen. Für zukünftige Fahrten ohne den Menschen als Rückfallebene wäre ein Sicherheitssystem notwendig, dass eigenständig in der Lage ist, das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu überführen. Auch das ist eine zentrale Forschungsfrage, die im Projekt untersucht wird. Im Idealfall bedeutet dies auch, dass ein solches System einen Ausfall oder eine Fehlfunktion nicht nur erkennt, sondern sogar prädiziert, um eine Möglichkeit zur Fehlerbehebung zu gewährleisten.

Tabelle 4.2 fasst die wesentlichen Unterschiede zwischen der Urban Challenge und dem Projekt Stadtpilot in den dargestellten Themenbereichen zusammen.

Tabelle 4.2.: Gegenüberstellung der Rahmenbedingungen von DARPA Urban Challenge 2007 und dem Forschungsvorhaben Stadtpilot

<i>DARPA Urban Challenge</i>	<i>Projekt Stadtpilot</i>
Projektrahmen, Gesamtausrichtung	
Einmaliger Wettbewerb, Siegerprämie	Langfristiges Forschungsvorhaben
Abgesperrtes, nicht-öffentliches Gelände	Öffentlicher Straßenverkehr
DARPA-Reglement	Straßenverkehrsordnung
Grundlegender Infrastrukturrahmen	
Stillgelegtes Kasernengelände	Stark besiedelte Umgebung
T-Kreuzungen und 4-Way-Stops	Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen
Befestigte und unbefestigte Straßen	Ausschließlich befestigte Straßen
Ungestörter GPS-Empfang	GPS-Abschattungen durch Bebauung
Fehlertolerante Infrastruktur	Erhöhte Präzision, Regeltreue gefordert
Allgemeine Umgebungsbedingungen	
Durch Stuntfahrer gesteuerter Verkehr	Reales Verkehrsaufkommen
Autos und statische Hindernisse	Vielfältige Verkehrsteilnehmer
Defensives Fahrverhalten der Stuntfahrer	Unterschiedlichste Fahrstile
Eigenständige Geschwindigkeitswahl	Geschwindigkeit folgt aus Verkehrsfluss
Einfädeln in den fließenden Verkehr	Abbiegen durch fließenden Verkehr
Interaktion zwischen Roboterfahrzeugen	Umfeldverhalten vereinzelt regelwidrig
Abgeleitete Testträgeranforderungen	
Fast beliebige Fahrzeugänderungen	Einhalten der Fahrzeugkontur
Überwachung durch ext. Notaussystem	Eigenüberwachung, Sicherheitsfahrer

4.5. Ein Vergleich mit VaMP

Abschließend zur Projektvorstellung wird ein Vergleich mit dem Versuchsträger VaMP⁸ vorgenommen, einem der bedeutendsten Versuchsträger der Forschung im Themenbereich autonomer Straßenfahrzeuge, der auch im öffentlichen Straßenverkehr erprobt wurde.

Autobahn- vs.
Stadtszenarien

Zunächst fällt auf, dass in den Forschungsvorhaben der 1990er Jahre meist Szenarien auf Autobahnen gewählt wurden, denn die im Vergleich mit Stadtszenarien strukturierte Umgebung bot sich für die Pionierarbeiten auf diesem vergleichsweise neuen Forschungsgebiet an. Erst mit der DARPA Urban Challenge haben sich die Forscher im größeren Umfang den städtischen Szenarien angenommen.

Öffentliches vs.
abgesperrtes
Gelände

Zwar sind die Szenarien sehr unterschiedlich, aber bereits der Versuchsträger VaMP hatte einen derart hohen Standard erreicht, dass Testfahrten im größeren Umfang im öffentlichen Straßenverkehr vorgenommen werden konnten. Demgegenüber fanden alle DARPA Wettbewerbe auf einem abgesperrten, nicht-öffentlichen Gelände statt. Im Rahmen des Stadtpilot-Projekts werden die Erfahrungen aus der Urban Challenge nun wieder in eine reale, öffentliche Umgebung übertragen. Sowohl die Fahrten mit dem VaMP-Versuchsträger als auch im Stadtpilot-Projekt finden damit im fließenden Verkehr mit einem realen Verkehrsaufkommen und unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern entsprechend der gewählten Szenarien statt. Gleiches gilt für die Geschwindigkeitswahl, die sich vor allem auf dem Braunschweiger Stadtring sehr stark am Verkehrsfluss orientiert und nicht beliebig wählbar ist.

Sowohl Aktivi-
täten mit dem
Versuchsträger
VaMP als auch
Stadtpilot sehr
langfristig angelegt

In der Definition des Gesamtvorhabens gibt es einige Parallelen zwischen den Aktivitäten rund um den Versuchsträger VaMP und dem Stadtpilot-Projekt. Beide Forschungsvorhaben zeichnen sich durch einen langfristigen Ansatz aus. Die Wettbewerbe der DARPA waren hingegen als einmalige Ereignisse konzipiert und die Arbeiten fanden primär mit Zielsetzung auf das jeweilige Abschlussevent statt. Entsprechend waren die Kurse vom Veranstalter vorgegeben, während die genauen Szenarien für die Testträger VaMP und Leonie selbstdefiniert sind.

Interessant ist auch ein Vergleich der Wahrnehmungssysteme. Die kamerabasierte Umfelderkennung spielte eine tragende Rolle für die autonomen Fahrten auf Autobahnen in den 1990er Jahren. In neueren

⁸Es handelt sich um einen mit ungefähr 60 Transputern ausgerüsteten Mercedes-Benz 500 SEL der Universität der Bundeswehr München unter Leitung von Prof. Dr. E.D. Dickmanns (vgl. Abschnitt 2.2.1).

Projekten wird hingegen auch verstärkt auf Radar- und Lidar-Sensorik gesetzt. Ein Grund dafür ist die vereinfachte Nutzung solcher aktiven Sensorsysteme, die bereits eine interne Datenvorverarbeitung und ein Objekttracking besitzen. Kamerabasierte Wahrnehmung bietet den Vorteil günstiger Sensoren, erfordert im Gegenzug aber ausgereifte, langjährig aufgebaute Kompetenzen im Bereich der Bildverarbeitung.

Aktive vs. passive
Sensorik

Die kamerabasierte Wahrnehmung wurde im Versuchsträger VaMP auch dazu genutzt, das Fahrzeug innerhalb erkannter Fahrstreifenmarkierungen zu positionieren. Es fand keine absolute Ortung durch externe Hilfssignale statt. Im eigentlichen Sinne ist der VaMP-Testträger damit ein rein bordautonomes Straßenfahrzeug. Sowohl in den DARPA Wettbewerben als auch auf dem Braunschweiger Stadtring erfolgt eine absolute Ortung mit GPS-Technik. Besonders die nur sporadisch vorhandenen Fahrstreifenmarkierungen erfordern eine Absicherung der Navigation mit einer absoluten Ortungslösung.

Absolute vs.
relative Ortung

Insgesamt konnten mit dem Versuchsträger VaMP eine Reihe beeindruckender Erfolge erreicht werden. In einigen technischen Details sind heutige Testträger in ihren Fähigkeiten nur bedingt fortschrittlicher. Tabelle 4.3 stellt die unterschiedlichen Projekte gegenüber.

Tabelle 4.3.: Ein Vergleich aktueller Vorhaben mit den Aktivitäten rund um den Versuchsträger VaMP

<i>Versuchsträger VaMP</i>	<i>DARPA Grand Challenge</i>	<i>DARPA Urban Challenge</i>	<i>Projekt Stadtpilot</i>
Aktivitätszeitraum			
Mitte der 1990er Jahre	2005	2007	Seit Mitte 2008
Infrastrukturrahmen			
Öffentlicher Straßenverkehr Autobahnen	Nicht-öffentliches Gelände Unbefestigte Straßen	Nicht-öffentliches Gelände Idealisierte städtische Umgebung	Öffentlicher Straßenverkehr Reale städtische Umgebung
Umfeldbedingungen			
Reales Verkehrsaufkommen PKW und LKW	Nur statische Hindernisse	Simulierter Verkehr PKW und statische Hindernisse	Reales Verkehrsaufkommen Vielfältige Verkehrsteilnehmer
Geschwindigkeitsbereich			
Bis zu 180 km/h Ø autobahnüblich	Höchstgeschwindigkeit ca. 80 km/h Ø 30,7 km/h	Maximal 47,2 km/h (30 mph) Ø bis zu 22,5 km/h	Stadtüblich (bis ca. 60 km/h) Ø bis zu 45 km/h
Systemüberwachung			
Sicherheitsfahrer	Externes Notausssystem	Externes Notausssystem	Sicherheitsfahrer
Strecke			
Selbstdefinierte Kurse 158 km ohne menschlichen Eingriff Diverse weitere Langstreckenfahrten	Vorgegebener Kursverlauf 212 km ohne menschlichen Eingriff Unbekanntes Terrain	Vorgegebener Kursverlauf 96 km ohne menschlichen Eingriff Unbekanntes Terrain	Selbstdefinierte Kurse
Wahrnehmungssystem			
Kamerabasierte Wahrnehmung teilweise Radarsensorik	Lidar und Radar Sensorik Teilweise Kameras	Lidar und Radar Sensorik Teilweise Kameras	Lidar und Radar Sensorik
Finanzierung			
PROMETHEUS Projekt CLEOPATRA Projekt u. a.	Organisierter Wettbewerb Eigenfinanzierung, Sponsoren	Organisierter Wettbewerb Eigenfinanzierung, Sponsoren DARPA Finanzierung möglich	Eigenfinanzierung
Ortung			
Keine GPS-Ortung Fahrstreifenmarkierungen	GPS-Ortung Schwierige Wegranderkennung	GPS-Ortung Spärliche Fahrstreifenmarkierungen	GPS-Ortung Spärliche Fahrstreifenmarkierungen
Erfolge			
Tausende Testkilometer Langstreckenfahrt München-Odense	Fünf Roboter absolvierten Strecke	Sechs Roboter absolvierten Strecke	Georeferenzierte Karte Erste autonome Stadtring-Fahrten

5 Analyse der Stadtpilot-Umgebung

Die Entwicklung eines autonomen Straßenfahrzeugs für eine bis dahin nicht autonom befahrene Verkehrsumgebung bedarf einer grundlegenden Analyse sowie Ableitung der Anforderungen an die einzelnen Teilmodule und das Gesamtsystem. Die Herausforderungen der Stadtring-Umgebung an die verschiedenen Module eines autonomen Straßenfahrzeugs sind mannigfaltig: Das vielfältige Umfeld erfordert innovative Ansätze in den Wahrnehmungsalgorithmen, Abschattungen durch Bäume und Häuser erschweren die Positionierung des Fahrzeugs, und eine autonome Fahrt im realen Straßenverkehr verlangt ein ausgereiftes Sicherheitskonzept. Die Module zur Generierung und Umsetzung von Fahrentscheidungen stehen durch die realen städtischen Szenarien vor neuen Herausforderungen. Es werden Situationen autonom befahren, die durch bisher in der Literatur bekannte Ansätze nicht realisierbar sind. Die Straßengeometrie des historisch entstandenen Fahrbahnverlaufs weist unterschiedliche Fahrstreifenbreiten, enge Kurven und lange Geraden auf und erfordert daher einen flexiblen Algorithmus zur Trajektorienplanung.

Neue, bisher
unerforschte
Situationen

In den folgenden Abschnitten werden aus den Herausforderungen des Stadtpilot-Projekts die für die Fahrzeugführung resultierenden Rahmenbedingungen beschrieben, die das in dieser Dissertation beschriebene System zur Umsetzung von Fahrentscheidungen motiviert haben.

5.1. Ableitung der Anforderungen

Durch die Manöervielfalt des realen städtischen Umfelds des Braunschweiger Stadtrings steigen die Anforderungen an das Fahrzeugführungssystem deutlich an. Abbildung 5.1 zeigt beispielhaft die Anzahl an gemessenen Fahrmanövern auf einem Teilstück der Autobahn A2 in Höhe des Braunschweiger Flughafens im Vergleich zu einem Teilstück des Auftaktszenarios auf dem Braunschweiger Stadtring (vgl. Abschnitt 4.2.2). Es wird ersichtlich, dass auf dem Stadtring ungefähr 12 bis 14 mal mehr Fahrmanöver pro Verkehrsteilnehmer durchgeführt werden, wobei die vergleichsweise kleine Datengrundlage nur eine eingeschränkte

quantitative Aussage erlaubt. Ziel ist die Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems, dass die hohe Anzahl an Fahrmanövern beherrschbar macht, sich aber zugleich in jeder Situation für den Nutzer vorhersagbar verhält.

Tabelle 5.1.: Ergebnisse der Zählung der von den Verkehrsteilnehmern durchgeführten Fahrmanöver auf einem Teilstück der Autobahn A2 in Höhe des Braunschweiger Flughafens und auf zwei Teilstücken des Auftaktszenarios auf dem Braunschweiger Stadtring (vgl. Abschnitt 4.2.2) zwischen dem Naturhistorischen Museum und dem Haus der Elektrotechnik; die Anzahl der Fahrmanöver setzt sich aus Fahrstreifenwechseln, Abbiegevorgängen und Einparkvorgängen auf den seitlichen Parkstreifen zusammen; Zeitpunkt der Zählung: 14.9.2011, 8:05 Uhr bis 8:25 Uhr

Zählgröße	Teilstück A2	Stadtring 1	Stadtring 2
Gesamtanzahl Fahrzeuge	1365	915	788
Streckenlänge	1800 m	450 m	350 m
Anzahl Fahrmanöver	199	417	311

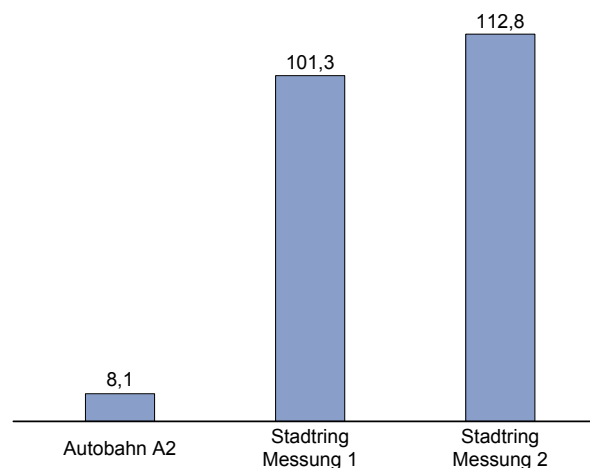


Abbildung 5.1.: Vergleich der Häufigkeit an Fahrmanövern auf Autobahnen im Vergleich zur Häufigkeit im Stadtverkehr basierend auf Tabelle 5.1; die Werte geben die durchschnittliche Anzahl an Fahrmanövern an, die ein Verkehrsteilnehmer pro 100 km Streckenlänge vornimmt

Definition Szene
und Situation

Bei der Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems wird dabei zwischen einer Szene und einer Situation unterschieden. Eine Szene beinhaltet zunächst die Beschreibung von Straßeninfrastruktur und Objekten durch die aktuelle Position und dazugehörige Bewegungsvektoren zu einem beliebigen, fest definierten Zeitpunkt. Durch die Interpretation dieser Beschreibung und die Ableitung der Intention von Objekten wird

eine Szene zu einer Situation aufgewertet, wobei der Begriff Objekt synonym mit physikalischem Objekt zu verstehen ist. In (Mock-Hecker, 1994) liefert der Autor eine Definition einer Verkehrssituation, die auch in (Maurer, 2000) aufgegriffen wird und auch für diese Arbeit Gültigkeit besitzt: „Eine Verkehrssituation ist dabei der zu einem bestimmten Zeitpunkt existierende Zustand des erfassten Ausschnitts der Verkehrswelt, der in dem hier verfolgten Ansatz durch bestimmte physikalische Zustandsgrößen der involvierten Fahrzeuge, den zu diesem Zeitpunkt von den Fahrzeugen durchgeführten Aktionen und den erwarteten Plänen der Agenten beschrieben wird. Die aus dieser Definition resultierende Beschreibung einer Verkehrssituation schließt nicht nur den aktuellen Zustand der Verkehrswelt in einer bestimmten Verkehrssituation ein, sondern auch deren wahrscheinliche, weitere Entwicklung¹.“

Für die Überführung der Verkehrssituation in ein regelkonformes und sicheres Aktionskonzept eines autonomen Straßenfahrzeugs werden Algorithmen zur Fahrentscheidungsfindung benötigt. Grundsätzlich sind in der Literatur manöverbasierte und verhaltensbasierte Ansätze und eine Kombination aus beidem, sog. hybride Systeme, bekannt.

Beim manöverbasierten Fahren wird das repräsentierte Wissen meist durch explizit im System hinterlegte Regeln abgebildet, wodurch Entscheidungen der Form „Wenn Fall A, dann verhalte dich entsprechend B“ getroffen werden. Solche Systeme zeichnen sich durch ein sehr deterministisches Verhalten aus. Durch die Darstellung des inneren Zustands wird unmittelbar der Systemzustand beschrieben. Solche Architekturen werden auch als funktionsbasiert bzw. deliberativ bezeichnet und weisen klare, hierarchische Strukturen sowie eine starke Abhängigkeit von einer symbolischen Repräsentation der Welt auf. Der Planungsalgorithmus ergibt eine Sequenz von Aktionen (Fahrmanöver), die sicher und regelkonform auf ein Ziel zuführen. Diese Zielorientierung ist ein wesentliches Charakteristikum deliberativer Systeme (Arkin, 1998).

Allerdings wird das sehr verlässliche, zielorientierte Verhalten im Gegenzug durch einen stark ansteigenden Komplexitätsgrad bei einer zunehmenden Anzahl an Situationsdetails ermöglicht. Kleine Modifikationen an einzelnen Regeln können großen Anpassungsbedarf des übrigen Regelwerks zur Folge haben. Um die Komplexität solcher Systeme zu beherrschen, haben sich hierarchische Zustandsautomaten durchgesetzt,

Explizite Abbildung von Regeln in der manöverbasierten Fahrzeugführung

Hierarchische Zustandsautomaten

¹Mock-Hecker (1994), S. 4; laut Maurer (2000) werden in dieser Definition allerdings Umwelteinflüsse vernachlässigt.

die bereits sowohl in autonomen als auch assistierenden Fahrzeugsystemen weit verbreitet sind. Eine regelbasierte Implementierung wird beispielsweise in (Cremer et al., 1994) vorgestellt. Um ein ständiges Oszillieren zwischen verschiedenen Zuständen zu verhindern, werden die Zustandstransitionen eher starr ausgelegt. Das Fahrverhalten autonomer Fahrzeuge mit regelbasierten Entscheidungsmodulen ist daher meist konservativ und unflexibel.

Verhaltensbasierte Ansätze behandeln Situationen demgegenüber generalisiert und bilden ein Regelwerk implizit ab. Eine der bekanntesten Architekturen ist die Subsumptionsarchitektur von (Brooks, 1986), bei der jeder Verhaltensweise eine bestimmte Aufgabe zugeordnet ist.

Überlagerung
verschiedener
Verhalten ergibt
Fahrentscheidung

Eine verhaltensbasierte Architektur ist auch im Rahmen von DAMN² umgesetzt (Rosenblatt, 1997)³. Eine Reihe unabhängiger Verhalten („Halten eines Fahrstreifens“, „Vermeiden von Hindernissen“, „Erreichen eines Ziels“,...) werden mit einer Gewichtung durch einen sogenannten Arbitr⁴ zusammengeführt. Aus der Summe der Verhaltensempfehlungen berechnet sich eine Fahrentscheidung, die anschließend der Fahrzeugregelung zur Verfügung steht. Der Entscheidungsprozess wird als verteilt und asynchron bezeichnet und braucht keine hierarchische Struktur. In (Arkin, 1998) sind solche Systeme als verhaltensbasierte, reaktive Architekturen benannt, bei denen eine enge Kopplung von Wahrnehmung und Aktion vorliegt. Jede Aktion wird als direkte Reaktion auf einen vom System wahrgenommenen Stimulus interpretiert, wobei verschiedene solcher Verhalten autark voneinander im System arbeiten. Der Vorteil der Generalisierung führt allerdings zu einem Verlust an Determinismus, da z.B. die Regeln der Straßenverkehrsordnung nicht explizit im System formuliert sind, sondern sich implizit aus der Überlagerung verschiedener Verhalten ergeben.

Hybrider Ansatz
kann die Vorteile
kombinieren

Ein hybrides Entscheidersystem kann die Vorteile beider Ansätze miteinander kombinieren: Während alltägliche, vorhersehbare Situationen durch ein im System hinterlegtes Regelwerk explizit abgebildet werden können, lassen sich weniger strukturierte Fahrscenen am besten durch eine implizite, verhaltensbasierte Darstellung beschreiben, die

²Distributed architecture for mobile navigation

³Im Unterschied zu einer klassischen verhaltensbasierten Architektur ist es in DAMN allerdings vorgesehen und möglich, deliberative Modelle innerhalb der Verhalten zu verwenden. In diesem Fall würde es sich um eine hybride Architektur handeln.

⁴Der Arbitr, engl. für Schiedsrichter, hat zur Aufgabe, die unterschiedlichen Verhalten zu gewichten, um damit eine Fahrentscheidung zu bestimmen.

Situationen generalisiert behandelt. In Abschnitt 3.2.1 wurden einige be-

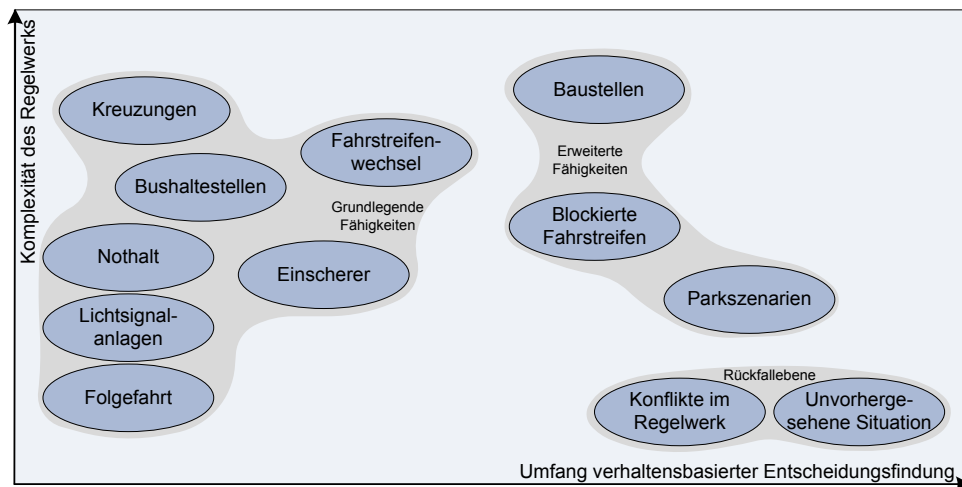


Abbildung 5.2.: Situationsspezifischer Anteil regel- oder verhaltensbasierter Entscheidungsfindung an der Fahrzeugführung

sondere Szenen aus der DARPA Urban Challenge beschrieben, in denen der Versuchsträger Caroline einen besonderen Umgang mit bestimmten Fahrsituationen zeigte. Obwohl diese kreative Verhaltensweise zu teilweise nicht-regelkonformem Verhalten führte, war diese Eigenschaft des Systems in einigen unvorhergesehenen Situationen sehr hilfreich. Für eine städtische Umgebung wie den Braunschweiger Stadtring, der sich durch eine hohe Situationsvielfalt und Häufigkeit von Fahrmanövern auszeichnet, bietet es sich daher an, die regelbasierten Fahrzeugfähigkeiten um eine verhaltensbasierte Entscheidungsfindung zu erweitern. Ziel des Stadtpilot-Systems ist die Verknüpfung beider Verfahren, um situationsspezifisch regel- oder verhaltensbasiert Fahrentscheidungen zu treffen und damit die Anzahl an durchzuführenden Fahrmanövern zu reduzieren. Abbildung 5.2 zeigt die unterschiedliche Ausprägung von Entscheidungsfindungen anhand üblicher Situationen des Stadtverkehrs.

Regel- und verhaltensbasierte Fahrzeugführung

5.2. Manöverübergreifende autonome Fahrzeugführung

Die Ausprägung eines hybriden Systems als Kombination aus manöver- und verhaltensbasierter Entscheidungsfindung wird an einer typischen Verkehrssituation des Braunschweiger Stadtrings beschrieben. Abbildung 5.3 links zeigt eine Luftaufnahme der Kreuzung von Rebenring und

Pockelsstraße, bei der in das Zentralgebiet der Technischen Universität eingefahren wird. Da bei Anfahrt aus östlicher Richtung kein expliziter

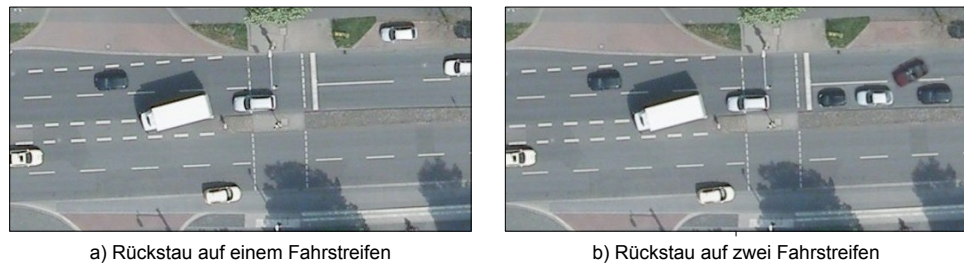


Abbildung 5.3.: Luftaufnahme des Braunschweiger Stadtrings an der Kreuzung von Rebenring und Pockelsstraße, Luftbild: ©Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation (NR. 011/2010)

Linksabbiegefahrstreifen vorliegt, kommt es besonders in dichtem Verkehr zu Rückstausituationen auf dem linken Fahrstreifen.

In einem regelbasierten Fahrentscheider lässt sich die dargestellte Szene regelkonform und deterministisch erfassen (Abbildung 5.4).

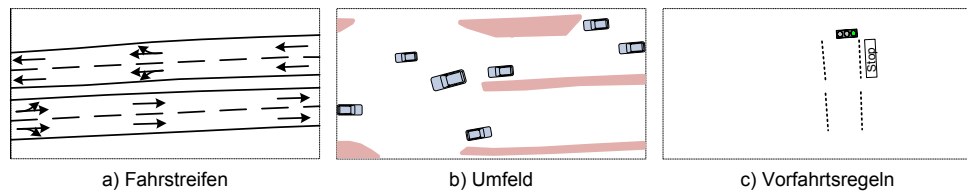


Abbildung 5.4.: Abbildung einer Verkehrsszene des Braunschweiger Stadtrings durch ein im System hinterlegtes Regelwerk

Modellierung der Fahrstreifen: Die Kenntnis der genauen Lage der Fahrstreifenbegrenzungen ermöglicht dem Regelwerk eine eindeutige Unterscheidung in erlaubte und verbotene Fahrbereiche, so dass nur der Raum innerhalb der Fahrstreifenbegrenzungen dem System richtungsgebunden als befahrbar bekannt ist. Damit wird verhindert, dass beispielsweise Ausweichbewegungen in Richtung der Parkstreifen oder Fußwege erfolgen, die ein erhöhtes Risiko und sicherheitskritische Situationen zur Folge haben können.

Abbildung des Umfelds: Das Umfeld kann durch eine objekt- und belegungsgitterbasierte Darstellung repräsentiert werden. Bei einem Fahrstreifenwechsel erfolgt beispielsweise eine Bewertung bewegter Objekte durch Risikomaße, die eine Auskunft über Zeitlücken, Abstand und

Reproduzierbare
Situationen durch
regelbasiertes
System darstellbar

Fahrstreifen

Umfeld

Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf den Nachbarfahrstreifen geben. Sind gewisse Bedingungen erfüllt, erlaubt das Regelwerk einen Fahrstreifenwechsel.

Repräsentation der Vorfahrtsregeln: Der Status der Lichtsignalanlage und die grundlegenden Vorfahrtsregeln werden durch eindeutige Zustände im System hinterlegt. Das Resultat ist ein verlässlicher Umgang mit der jeweiligen Signalphase und der Beachtung des Verkehrsumfeldes in Vorfahrtssituationen.

Vorfahrtsregeln

Über das Regelwerk werden im Entscheidungsmodul auf Basis dieser Informationen die verschiedenen Handlungsoptionen hinterlegt. Es besteht die Möglichkeit, in dem Fahrstreifen des Rückstaus zu verbleiben oder einen Wechsel in den benachbarten Fahrstreifen vorzunehmen. Die Geschwindigkeit leitet sich adaptiv aus dem Verhalten der umgebenden Verkehrsteilnehmer ab. Das Resultat dieser Implementierung führt zu einem regelkonformen und deterministischen Verhalten.

In der dargestellten Situation des Braunschweiger Stadtrings sind diverse Szenenausprägungen denkbar, deren Abbildung über einen Zustandsautomaten zu einem sehr komplexen Regelwerk führen würde. Abbildung 5.3 rechts zeigt neben der ursprünglichen Szene eine Variation, die zwar nicht alltäglich geschieht, aber sich dennoch gelegentlich ereignet. Ein Fahrzeugführer auf dem rechten Fahrstreifen hat es versäumt, sich rechtzeitig auf den linken Fahrstreifen einzuordnen, um an der Kreuzung links abzubiegen. Der Versuch, sich zwischen die Fahrzeuge im Rückstau einzufädeln, führt zu einer Behinderung auf dem rechten Fahrstreifen. Im Gegensatz zu Autobahnen ist es bei den Umfeldbedingungen des Stadtverkehrs durchaus üblich, alternative Fahrstrategien zu durchdenken. Im Beispiel führt dies dazu, dass die nachfolgenden Fahrzeuge des rechten Fahrstreifens über den Parkstreifen ausweichen.

Unerwartetes Verhalten nicht abgebildet

Ein regelbasierter Fahrentscheider ist nur bedingt in der Lage, sich den veränderten Umgebungsbedingungen entsprechend zu verhalten. Laut Regelwerk darf das Fahrzeug den Bereich des Fahrstreifens nicht verlassen. Es bräuchte eine komplexe Kombination von Regeln, um diesen Bereich kurzzeitig zu erlauben. Die Situation lässt sich zudem nur schwer generalisiert über ein Regelwerk beschreiben, da je nach geometrischer Ausprägung der Szene ein verändertes Verhalten gefordert ist. Das Resultat wäre ein enorm ansteigender Komplexitätsgrad.

Verhaltensbasierte
Fahrzeugführung
als alternative
Fahrstrategie

Demgegenüber bildet eine verhaltensbasierte Behandlung der Situation die Gegebenheiten sinnvoll ab (Abbildung 5.5). Eine Kombination unterschiedlicher Verhalten führt das Fahrzeug durch die unerwartete Situation.

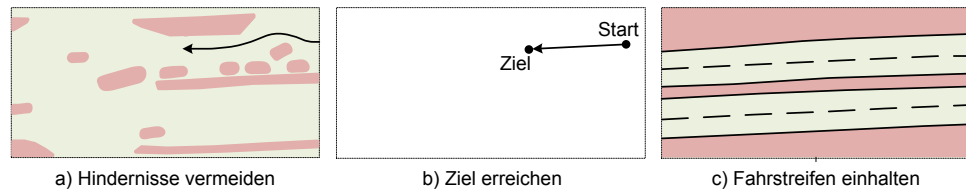


Abbildung 5.5.: Verhaltensbasierte Auflösung der abgewandelten Situation

Hindernisse
vermeiden

Vermeidung von Hindernissen: Das Umfeld, bestehend aus anderen Verkehrsteilnehmern, Bordsteinen, parkenden Fahrzeugen auf dem Seitenstreifen und anderen statischen Hindernissen, wird allgemein durch Zustände wie „belegt“ und „nicht belegt“ modelliert. Die Klassifikation des Umfelds ist nur insoweit notwendig, dass Hindernissen ein entsprechendes abstoßendes Potenzial zugewiesen wird. Ein Verhalten zur Hindernisvermeidung bahnt sich einen Weg über die erlaubten Gebiete.

Ziel erreichen

Anfahren eines Ziels: Ein weiteres Verhalten strebt das Erreichen eines Ziels vom ursprünglichen Startpunkt an. Damit wird das Fahrzeug grundsätzlich in die angestrebte Richtung gelenkt.

Fahrstreifen halten

Einhalten eines Fahrstreifens: Das Verbleiben innerhalb eines Fahrstreifens wird erreicht, indem der Bereich außerhalb des Fahrstreifens durch ein Verhalten als „nicht erlaubt“ beschrieben wird. Durch Überlagerung mit anderen Verhalten ist ein Verlassen des Fahrstreifens allerdings durchaus möglich.

Die Gewichtung der verschiedenen Verhalten zur Meidung von Hindernissen, zum Anfahren eines Ziels und dem Folgen eines Fahrstreifens führt schließlich bei entsprechender Parametrisierung zu einer Ausweichbewegung über den Parkstreifen.

Die dargestellte Szene verdeutlicht, wie die autonome Fahrzeugführung in städtischer Umgebung durch eine Kombination regel- und verhaltensbasierter Entscheidungsfindung für bekannte Szenarien deterministisch,

für unvorhergesehene Situationen flexibel ermöglicht wird. Diese Art der Fahrzeugführung verlangt dafür allerdings ein situationsgetriebenes Ansteuern unterschiedlicher Steuereinheiten. Denkbar wäre dafür ein definierter, kurzzeitiger Übergang in einen Modus der verhaltensbasierten Entscheidungsfindung mittels eines Zustandsautomaten, wobei die Transitionen von entscheidender Bedeutung sind (Abbildung 5.6). Die genaue Ausprägung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Allerdings ist die Art der Realisierung von Fahrentscheidungen auch über das vorgestellte hybride System zur Entscheidungsfindung motiviert.

Situationsgetriebene Entscheidungsfindung

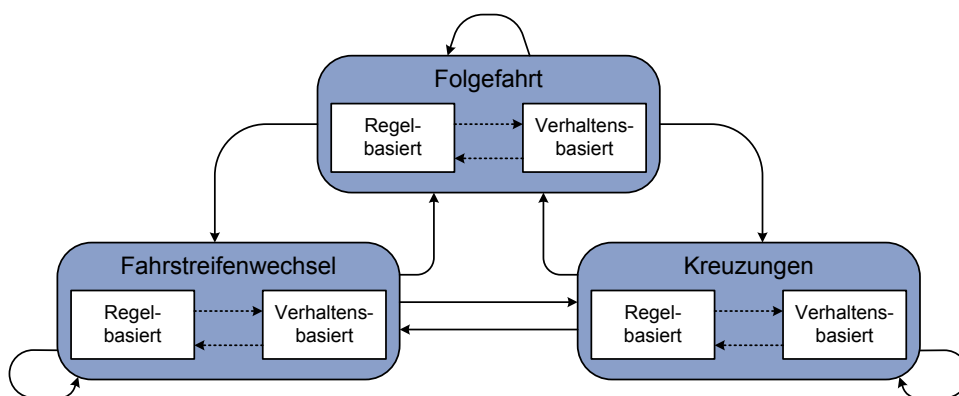


Abbildung 5.6.: Situationsgetriebenes Ansteuern unterschiedlicher Steuereinheiten über einen Zustandsautomaten

5.3. Manöverübergreifende Realisierung von Fahrentscheidungen

Während sich die manöverbasierte Entscheidungsfindung grundsätzlich von der verhaltensbasierten Fahrzeugführung unterscheidet, gibt es auch bei der Realisierung von Fahrentscheidungen grundlegende Unterschiede. Bei der klassischen, manöverbasierten Fahrzeugführung wird im Allgemeinen in Fahrmanövern geplant. Aus verschiedenen Manövern wie einer Folgefahrt oder einem Fahrstreifenwechsel erfolgt das Planen von manöverselektiven Trajektorien, die abschließend zu einer Gesamttrajektorie zusammengesetzt werden (Abbildung 5.7). Hierzu ist es erforderlich, bereits bei der Generierung der Einzeltrajektorien sowie insbesondere

Grundsätzliche Unterschiede in der Umsetzung einer Fahrentscheidung

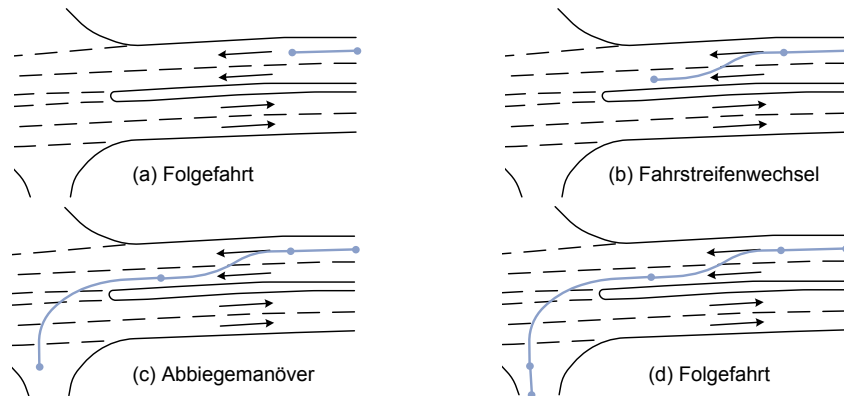


Abbildung 5.7.: Manöverselektive Planung von Trajektorien

bei deren Kombination fahrdynamische Randbedingungen im Detail zu berücksichtigen⁵.

Im Rahmen einer manöverübergreifenden Planung wird im Entscheidungsmodul hingegen auf eine exakte Betrachtung der Fahrzeugdynamik zunächst verzichtet. Anstelle einer eindeutig bestimmten Trajektorie wird ein Möglichkeitsraum vorgegeben, so dass im Rahmen der nachfolgenden Trajektorienoptimierung die Betrachtung der fahrdynamischen Aspekte hinsichtlich Komfort und Sicherheit über Manövergrenzen hinweg erfolgt (Abbildung 5.8).

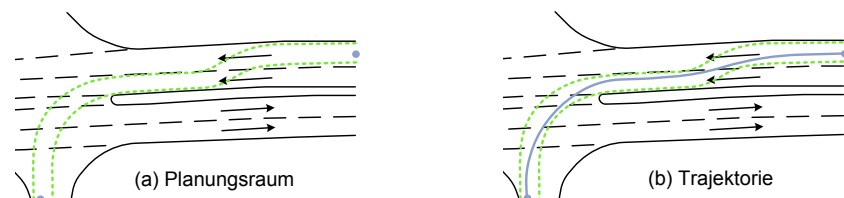


Abbildung 5.8.: Manöverübergreifende Planung von Trajektorien

Die Analyse der Stadtpilot-Rahmenbedingungen hat deutlich gemacht, dass sich die Anforderungen nicht nur an die Entscheidungsfindung, sondern auch an die Umsetzung solcher Fahrvorgaben von bisherigen Ansätzen unterscheiden. Es ist ein System gefordert, das unabhängig vom Fahrentscheideransatz fahrdynamisch optimierte Trajektorien bestimmt. Es gilt, sowohl manöver- als auch verhaltensbasiertes Fahren zu ermöglichen und durch die hohe Anzahl an Fahrmanövern pro Streckeneinheit eine manöverübergreifende Optimierung vorzunehmen. Im

⁵Zu den fahrdynamischen Randbedingungen gehören u.a. differenzierbare Trajektorienübergänge an den Manöverenden, die Krümmungsstetigkeit der Trajektorie sowie die Planung von Trajektorien mit möglichst geringer Krümmung.

weiteren Verlauf dieser Dissertation wird daher ein manöverübergreifender Ansatz vorgestellt, der die aus der Stadtring-Umgebung abgeleiteten Anforderungen an Flexibilität und Fahrdynamik erfüllt und im Versuchsträger Leonie umgesetzt wurde. Trajektorien werden unabhängig vom Fahrmanöver und Fahrentscheideransatz über Manöver hinweg optimiert ermittelt und eröffnen damit neue Möglichkeiten der Optimierung. Im Folgenden sind die abgeleiteten Anforderungen an die Umsetzung zusammengestellt:

Hohe Anzahl an Fahrmanövern: Im Vergleich zu autobahnähnlichen Umgebungen zeichnet sich eine Fahrt in einer realen städtischen Umgebung durch eine höhere Anzahl an Fahrmanövern pro Zeiteinheit und zurückgelegter Strecke aus. Durch die große Anzahl aufeinanderfolgender Manöver wird eine manöverübergreifende Optimierung sinnvoll, so dass Kurven optimal angefahren werden und damit die Lenkaktivität sowie die Querschleunigung bei autonomen Fahrten minimiert wird.

Regel- und verhaltensbasierte Entscheidungsfindung: Eine autonome Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring erfordert ein in jeder Situation vorhersagbares Verhalten des Systems. Ziel ist es, wie im letzten Abschnitt dargestellt, möglichst weitreichend die Situationen des Stadtrings durch ein explizit abgebildetes Regelwerk zu beherrschen. Aufgrund der großen Vielfalt an unterschiedlichen Situationen in innerstädtischen Szenarien bietet es sich allerdings an, die Stärken von manöverbasiertem und verhaltensbasiertem Fahren zu kombinieren, um damit die Anzahl an im System abzubildenden Fahrmanövern zu reduzieren. Die Fahrentscheidungen sind abschließend durch ein generalisiertes System zur Trajektorienplanung zu realisieren, das innerhalb des aus der Entscheidungsfindung vorgegebenen Möglichkeitsraumes hinsichtlich Fahrdynamik optimierte Trajektorien für die Fahrzeugregelung bereitstellt.

Umsetzung von
Fahraktionen
unabhängig
vom Ansatz zur
Entscheidungs-
findung

Umgebungsunabhängige Umsetzung: Auf dem Stadtring werden andere Konzepte im Bereich der Entscheidungsfindung untersucht, als beim autonomen Befahren des Parkplatzes vor dem Haus der Elektrotechnik notwendig sein werden. Bei Parkplatzsituationen handelt es sich im Vergleich zum Stadtring um eine weniger strukturierte Situation, da unter anderem keine eindeutigen Fahrstreifenmarkierungen vorliegen. Auch in diesem Fall wäre eine unabhängige, allgemeine Umsetzung von

Diversität der
Umgebung

Fahraktionen von Vorteil, die sich sowohl für den Stadtring als auch für Parkplatzsituationen anwenden lässt.

Nicht klotho-
idenbasierte Mo-
dellvorstellung

Innerstädtischer Straßenverlauf: In autobahnähnlichen Umgebungen erfolgt die Stützstellenpositionierung unter Annahme eines Klothoidenmodells, da der reale Straßenbau für Autobahnen im Regelfall auf Klothoiden basiert. Der Stadtring erfordert aufgrund seines historisch gewachsenen Straßenverlaufs hingegen einen Algorithmus, der Stützstellen zur Trajektorienberechnung innerhalb der Fahrbahngrenzen mit einer allgemeinen, nicht klothoidenbasierten Modellvorstellung optimiert positioniert. Ziel ist es, sowohl durch die Wahl von Stützstellen als auch durch die darauf aufbauende Berechnung fahrdynamisch optimierter Trajektorien auf beliebigen Straßenverläufen ein hohes Maß an Fahrsicherheit und -komfort zu erreichen.

Dualismus der
Fähigkeiten

Getrennte Abbildung vereinfacht Entwicklung: Die Fahrzeugführung zeichnet sich durch einen Dualismus der Fähigkeiten aus. Während die Ansätze zur Entscheidungsfindung stark an Robotikfragestellungen angelehnt sind und vorrangig als informationstechnische Fragestellungen verstanden werden, ist die Berechnung von optimierten Trajektorien eine Aufgabe der Fahrdynamik. Auf der einen Seite gibt es Ansätze zur Generierung von Bahnen, denen ein Fahrzeug kollisionsfrei und regelkonform folgt. Eine Optimierung der Bahn erfolgt wenn überhaupt nur aus der Fahrzeugumfeldererkennung heraus unter grundsätzlicher Berücksichtigung der Fahrzeugkinematik. Andere Ansätze dagegen führen zu fahrdynamisch optimierten Trajektorien, die eine Fahrentscheidung optimal durch ein Straßenfahrzeug abfahren lassen. Eine getrennte Abbildung dieser Fähigkeiten im Gesamtsystem vereinfacht die Entwicklung eines optimierten Gesamtfahrverhaltens, da die einzelnen Teilfähigkeiten durch Expertenkenntnisse separat realisiert werden.

5.4. Manöverübergreifende assistierende Systeme

Nicht nur in der autonomen Fahrzeugführung, sondern auch in fahrerunterstützenden Systemen besteht die Möglichkeit, Situationen manöver-

übergreifend zu behandeln. Die Herangehensweise bei der Entwicklung von Assistenzsystemen unterscheidet sich im Vergleich zu autonomen Systemen zwar zunächst grundlegend, da der Fahrer weiterhin in der Verantwortung bleibt. Trotzdem treten verwandte Fragestellungen auf.

In (Reichel et al., 2010) wird ein System zur automatischen Gefahrenbremsung vorgestellt, bei der das Assistenzsystem durch eine Ausweichanalyse den kollisionsfrei möglichen Aufenthaltsort des Fahrzeugs ermittelt. Ziel des Systems ist es, Auffahrunfälle auf stehende oder sehr langsam fahrende Hindernisse zu vermeiden. Stellt das System fest, dass ein Ausweichen nicht mehr möglich ist, greift es durch einen Bremsvorgang in die Längsführung ein.

Abbildung 5.9 zeigt eine Belegungskarte und ein Kamerabild bei einem nachgestellten Stauende mit Ausweichmöglichkeit in strukturierter Umgebung. Die Belegungskarten stellen beliebige Situationen dar, so dass sich eine generalisierte, manöverübergreifende Behandlung anbietet. Ziel ist es, einen kollisionsfrei befahrbaren Korridor beliebiger Form zu ermitteln, in dem im Anschluss eine Trajektorie mit möglichst hoher Stellreserve zu planen ist.

Manöverübergreifende Berechnung von Ausweichtrajektorien



Abbildung 5.9.: Visualisierung der Belegungskarte und Kamerabild bei einem nachgestellten Stauende mit Ausweichmöglichkeit in strukturierter Umgebung (Reichel et al., 2010). Der hell schraffierte Bereich im linken Bild zeigt den fahrbaren Bereich. Der rote Strich markiert das Ende des Bremsweges bei einer Vollbremsung. Im Kamerabild ist die Ausweichmöglichkeit hell hervorgehoben.

TEIL III: AUTONOME FAHRZEUGFÜHRUNG

Die Realisierung autonomer Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring erfordert aufgrund der herausfordernden Umgebungsbedingungen neue, innovative Ansätze zur Fahrzeugführung. Daher wurde ein Verfahren zur manöverübergreifenden Umsetzung von Fahrentscheidungen entwickelt, das den Anforderungen der Stadtpilotumgebung gerecht wird.

6 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen für die Umsetzung und Bewertung des Verfahrens zur manöverübergreifenden Realisierung von Fahrentscheidungen sind Gegenstand des folgenden Kapitels. Drei Abschnitte stellen die wesentlichen Grundlagen vor: Neben einer kurzen Einführung in die fahrdynamischen Zusammenhänge werden Bewertungskriterien für die Beurteilung von Querführungssystemen vorgestellt sowie einige mathematische Splinefunktionen behandelt.

6.1. Begriffe der Fahrdynamik

Unter der Annahme sehr kleiner Kurvenbeschleunigungen sind nur geringe Querkräfte zur Kurshaltung eines Straßenfahrzeugs notwendig und es tritt nahezu kein Schlupf auf, so dass das Rad sich nur in Umfangsrichtung bewegt. Die Geschwindigkeitskomponente am Kontaktpunkt zur Fahrbahn in lateraler Richtung verschwindet. Diese Annahme wird im Allgemeinen als kinematisches Reifenmodell bezeichnet.

Unter dieser Voraussetzung lässt sich mit dem Fahrzeuggradstand l und dem Abstand r des Momentalspols der Bewegung zum Mittelpunkt der Hinterachse der notwendige Lenkwinkel δ für eine Kurvenfahrt berechnen:

Ackermann-Modell

$$\tan(\delta) = \frac{l}{r} \quad (6.1)$$

Für kleine Lenkwinkel kann der Zusammenhang zu $\delta \approx \frac{l}{r}$ vereinfacht werden. Dieser Zusammenhang wird auch als das sogenannte Ackermann-Modell bezeichnet (Mitschke u. Wallentowitz, 2004). Da für die Krümmung $\kappa = \frac{1}{r}$ gilt, ist in dieser vereinfachten fahrdynamischen Darstellung der Lenkwinkel δ proportional zur Krümmung κ und die Lenkwinkelgeschwindigkeit $\dot{\delta}$ proportional zur Krümmungsänderung $\dot{\kappa}$. Eine Sollbahn für ein autonomes Straßenfahrzeug, die sowohl in Hinsicht auf Krümmung und Krümmungsänderung optimiert ist, führt damit zu geringen Lenkeinschlägen und zu reduzierter Lenkaktivität. Die Folge ist ein ruhiges Fahrverhalten.

Krümmung und
Krümmungs-
änderung als
Optimierungsgröße

Bei einer stationären Kreisfahrt berechnet sich die Querbeschleunigung über $a_{\varnothing} = m v^2 \kappa$ und ist damit ebenfalls proportional zur Krümmung der Trajektorie. Eine krümmungsoptimierte Sollbahn führt daher außerdem zu einer reduzierten Querbeschleunigung und damit zu einem sichereren und komfortableren Fahrverhalten.

Ein weit verbreitetes Fahrzeugmodell zur Beschreibung der Querdynamik eines Kraftfahrzeugs ist das sogenannte lineare Einspurmodell nach Riekert und Schunck (Mitschke, 2005; Popp u. Schiehlen, 1993; Rill, 1994). Für eine schnelle Erfassung und Analyse des Fahrverhaltens sind mit dem Einspurmodell einige vereinfachende Annahmen getroffen:

- Der Schwerpunkt des Fahrzeugs liegt auf Fahrbahnhöhe.
- Die Räder einer Achse werden zu einem Rad in der Spurmitte des Fahrzeugs zusammengefasst.
- Es liegt keine Beschleunigung in Fahrzeuginnenrichtung vor.
- Es treten keine Radlaständerungen und damit keine Wank- und Nickbewegungen auf.
- Die Seitenkraft am Reifen ist proportional zum Schräglaufwinkel.

Einspurmodell
nach Riekert und
Schunck

Das Resultat der vereinfachten Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines Kraftfahrzeugs ist der eingeschränkte Gültigkeitsbereich mit Querbeschleunigungen von bis zu ca. $4 \frac{m}{s^2}$ (Mitschke u. Wallentowitz, 2004). Abbildung 6.1 zeigt die Systemgrößen und Parameter des Einspurmodells. Für eine detaillierte Beschreibung und Herleitung der Gleichungen des Einspurmodells sei auf (Mitschke, 2005; Börner, 2006; Heißing, 2007) verwiesen.

Eingeschränkter
Gültigkeitsbereich

Für eine Betrachtung von querdynamisch kritischen Fahrsituationen ist es notwendig, die Nichtlinearität der Fahrzeugdynamik bei der Modellierung zu berücksichtigen. In (von Vietinghoff, 2008) wird ein Zweispurmodell vorgestellt, dass diese Nichtlinearität berücksichtigt, gleichzeitig aber möglichst einfach gehalten wird¹. Es werden alle vier Räder einzeln betrachtet und die Bewegungsgleichungen an diesem Modell aufgestellt. Die Seitenkräfte werden mittels Magic Tyre Formula (Pacejka, 2002), die Längskräfte durch ein einfaches Antriebsstrangmodell berücksichtigt. Für eine detaillierte Beschreibung und Herleitung des Fahrzeugmodells sei auf (von Vietinghoff, 2008) verwiesen.

¹Eine Implementierung des in (von Vietinghoff, 2008) beschriebenen Modells liegt für Simulationszwecke vor (Bergmiller u. Maurer, 2011).

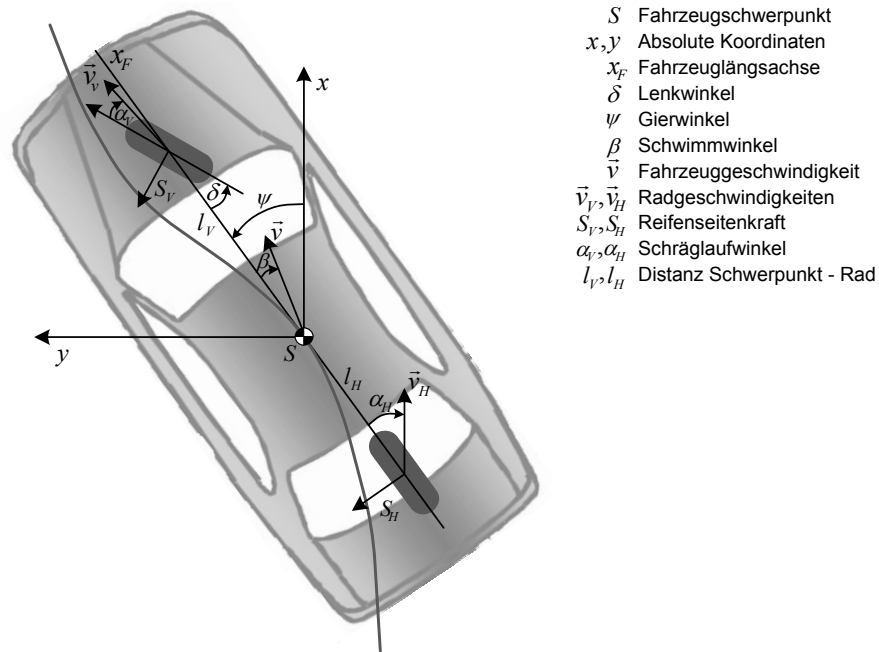


Abbildung 6.1.: Systemgrößen und Parameter des linearen Einspurmodells, Koordinatensysteme nach DIN 70000 (DIN-70000, 1994)

6.2. Bewertungskriterien der Fahrdynamik

Eine objektive Evaluierung von fahrdynamischen Regelsystemen erfordert die Definition von sogenannten Gütemaßen als Bewertungskriterien. Im Rahmen dieser Arbeit werden Gütemaße verwendet, um die Qualität des Systems zur Querführung eines autonomen Straßenfahrzeugs zu beurteilen. Als Grundlage der folgenden Darstellung dient die Studie zur Identifikation von Gütemaßen in der Querführung von 2009 am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig (Labenski, 2009).

Gütemaße zur
Bewertung des
Querführungs-
systems

Eine allgemeine Definition des Begriffs Gütemaß für die Verwendung innerhalb eines Regelungssystems, in dem die Zeit oder der Energieverbrauch Maßzahlen darstellen, ist in (Föllinger, 1994) gegeben. Demnach wird ein Gütemaß allgemein als Maßzahl verstanden, die die Qualität des Verhaltens eines Systems bewertet. Es wird davon ausgegangen, dass die Minimierung des Gütemaßes als Ziel definiert ist, d.h. es werden beispielsweise ein minimaler Energieverbrauch und das schnelle Erreichen eines bestimmten Zustands gefordert. Eine ähnliche Definition ist auch in der Fahrdynamik anwendbar, wobei die Minimierung nicht zwangsläufig das Ziel ist.

Die Beschaffenheit eines Gütemaßes kann sehr vielfältig sein. Während im regelungstechnischen Umfeld integrale Maße sehr verbreitet sind und wie beschrieben die Minimierung von Zeit und Energieverbrauch anstreben, sind Gütemaße in der Fahrdynamik oft physikalisch als Verhältniszahl begründet. Bei der Evaluation des Bremssystems eines Fahrzeugs wird die Qualität des Bremsmanövers beispielsweise durch das Verhältnis des maximal erreichbaren Bremsvorgangs zu einem idealen Bremsvorgang gemessen (Zomotor, 1987).

Vielfältige
Beschaffenheit von
Gütemaßen

Auch im Bereich der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen spielt die Definition von Gütemaßen eine zunehmend wichtigere Rolle. Stellt das Assistenzsystem beispielsweise wie beim Elektronischen Stabilitätsprogramm² ein Regelsystem dar, wird ein Maß für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit benötigt. In der Literatur ist die Geschwindigkeit des Bremskraftaufbaus beim ESP unter anderem als Gütemaß genannt (Van Zanten, 2006). Eine nicht physikalisch formulierte, aber bei der Auslegung beachtete Anforderung ist die notwendige Lenkaufwandreduzierung für den Fahrer.

Zunehmende
Bedeutung in der
Fahrerassistenz

Das Forschungsgebiet des autonomen Fahrens ist eng an die Fahrerassistenz angelehnt, so dass die Übertragung der in der Literatur bekannten Ansätze auf die autonome Fahrzeugführung angestrebt wird. Ziel im Forschungsgebiet der autonomen Straßenfahrzeuge ist es, die Leistungsfähigkeit der Fahrzeugführung qualitativ mit Gütemaßen zu beschreiben.

6.2.1. Gütemaße in der Fahrzeugführung

Die Fahrzeugführung besteht aus zwei Bewegungsrichtungen: Während auf die Längsführung über die Aktuatoren Gas- und Bremspedal Einfluss genommen wird, dient das Lenkrad als Aktuator zur Bestimmung der Querführung. Häufig besteht eine Überlagerung der beiden Bewegungsrichtungen, so dass eine strikte Trennung bei menschlichen Fahrern nicht immer möglich ist. Der sogenannte Kamm'sche Kreis stellt den idealisierten Zusammenhang zwischen Längs- und Seitenführungskraft am Rad eines Fahrzeugs dar (Mitschke u. Wallentowitz, 2004). Eine der wichtigsten Aussagen des Kreises ist daher, dass die maximalen Kräfte zur Längs- und Querführung voneinander abhängen. Die am Rad angreifende

²Beim Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) handelt es sich um ein Fahrerassistenzsystem für Kraftfahrzeuge, bei dem durch gezielten Bremseneingriff auf einzelne Räder das Schleudern des Fahrzeugs im Grenzbereich verhindert wird.

Längs- und Quer-
führung meist
separat bewertet

Gesamtkraft aus Längs- und Seitenführungskraft darf die maximale Haftkraft nicht überschreiten. Bei Fahrerassistenzsystemen erfolgt trotzdem häufig eine strikte Trennung zwischen den Bewegungsrichtungen, wie eine automatische Distanzregelung ACC oder ein Fahrstreifenhalteassistent verdeutlichen. Dabei wird ein ausreichender Abstand der Reifenkräfte bei den durchgeführten Fahrmanövern zur maximalen Haftkraft vorausgesetzt.

Längsführung:
Ruckfreies
Beschleunigen

In der Entwicklung von Assistenzsystemen für die Längsführung erfolgt bereits eine fundierte Bewertung der Qualität. Bei der Beurteilung von ACC-Systemen werden unter anderem weiche Übergänge zwischen Antrieb und Bremse sowie die Ausregelung von Störgrößen wie Gefälle gefordert. Die daraus abgeleiteten Gütemaße sehen vor, die spürbaren Beschleunigungswechsel auf ein Minimum zu reduzieren. Ziel ist ein ruckfreies Beschleunigen³ sowie die Einhaltung von Grenzwerten zur maximal zulässigen Beschleunigung und Verzögerung. Das Beispiel ACC verdeutlicht, dass die Qualität eines Assistenzsystems durch Gütemaße zumindest teilweise bewertet und über Gütemaße überprüft werden kann.

Querführung:
Unterscheidung
zwischen Komfort,
Fahrsicherheit
und Agilität

In der Literatur sind einige Ansätze zur Bewertung der Querführung des Fahrzeugs mit Maßzahlen unter Beachtung bestimmter Aspekte verfügbar, die die Qualität des Führungssystems bewerten. Wie in (Heißing, 2007) dargestellt, werden die Gesamtfahrzeugeigenschaften Komfort und Sicherheit als ausschlaggebende Gestaltungsmerkmale des Fahrwerks angesehen. Nach (Öttgen u. Bertram, 2007) erfolgt in der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen die Bewertung mit kategorisierten Gütemaßen, die in die fahrdynamischen Aspekte Komfort, Fahrsicherheit und Agilität unterteilt werden. Die drei Begriffe sind in (Öttgen, 2005) wie folgt definiert:

Komfort: „Der Fahrkomfort beschreibt die Fahreigenschaften eines Personenkraftwagens, die das Führen eines Fahrzeuges angenehm gestalten und die Fahrzeuginsassen sowie transportierte Güter möglichst geringen Belastungen aussetzen.“⁴

Fahrsicherheit: „Der Begriff Fahrsicherheit bezeichnet, bezogen auf die Querdynamik eines Personenkraftwagens, die Reserve der Seitenführung an der Vorder- und Hinterachse in Bezug zu den physikalischen Grenzen in dynamischen Fahrsituationen.“⁵

³Als Ruck wird die zeitliche Ableitung der Längsbeschleunigung bezeichnet.

⁴(Öttgen, 2005), S. 8

⁵ebd, S. 8

Agilität: „Der Begriff Agilität beschreibt die Empfindlichkeit der Reaktion eines Personenkraftwagens auf Anregungen durch den Fahrer und den vom Fahrer aufzubringenden Aufwand, das Fahrzeug der gewünschten Bahn folgen zu lassen.“⁶

Für die Untersuchungen im Rahmen des Fahrzeugführungssystems des Stadtpilot-Projekts sind vor allem die Bereiche Fahrsicherheit und Komfort von besonderer Bedeutung. Es werden daher ausschließlich Gütemaße aus diesen Bereichen verwendet, die im Folgenden kurz vorgestellt sind.

Fahrsicherheit und
Komfort von zen-
traler Bedeutung

6.2.2. Direkte Messgrößen

Bei der Beschreibung der Qualität des Querführungssystems eines autonomen Straßenfahrzeugs bietet sich zunächst die Auswertung direkt vorliegender Messgrößen an. Dazu zählt die sogenannte Querablage, die die laterale Abweichung des Fahrzeugs von einer Solltrajektorie beschreibt. Die Querablage ist in der automatischen Fahrzeugführung ein wichtiges Beurteilungskriterium, da Abweichungen von der Sollbahn eine potenzielle Gefährdung bedeuten (Müller u. Rohleder, 2006). Sowohl die absolute maximale Querablage d_{\max} als auch die durchschnittliche Abweichung d_{\varnothing} von der Sollbahn werden als Gütemaß ausgewertet und überwacht. In (Lammen, 1993) ist sogar vorgeschlagen, die Querablage in die Definition eines dynamischen Verkehrsraumes aufzunehmen, in dem ein Straßenfahrzeug sicher und stabil bewegt wird. Die maximal erlaubte Querablage beschreibt damit einen einhüllenden Schlauch um die Sollbahn, der während der autonomen Fahrt nicht verlassen werden darf.

Durchschnittliche
und maximale
Querablage

Eine weitere auszuwertende Messgröße stellt der eingestellte Lenkwinkel dar. Ziel eines Querführungssystems ist es, ein definiertes Fahrmanöver mit möglichst geringem Lenkwinkel zu absolvieren. Das Resultat ist ein höherer Abstand zur Haftungsgrenze des Fahrzeugs sowie ein erhöhter Fahrkomfort. Sowohl der maximale Lenkwinkel δ_{\max} als auch der Durchschnitt der Stellgröße δ_{\varnothing} ist bei der Auswertung von Interesse.

Durchschnittlicher
und maximaler
Lenkwinkel

Die Bedeutung der Querbeschleunigung wurde in den 1980er Jahren in mehreren Studien untersucht (Schimmelpfennig u. Hebing, 1982; Schimmelpfennig u. Nackenhorst, 1985). Eine geringere Querbeschleunigung führt zu einem sichereren und komfortableren Fahrmanöver. Daher ist

Durchschnittliche
und maximale
Querbeschleuni-
gung

⁶ebd., S. 9

wie bei der Auswertung des Lenkwinkels der maximale $a_{q, \max}$ und der durchschnittliche Wert a_{\varnothing} der Querbeschleunigung von Bedeutung.

Lenkgeschwin-
digkeit

Die Auswertung der Lenkgeschwindigkeit $\dot{\delta}_{\varnothing}$ beschreibt die Anforderungen an die Stellfähigkeit des Lenkaktuators und lässt damit Rückschlüsse auf Stellreserve und Fahrkomfort zu. Je weniger dynamisch die Stellvorgänge sind, desto sicherer und komfortabler ist eine Fahrt.

6.2.3. Abgeleitete Beurteilungsmaße

Neben den direkten Messgrößen, die unmittelbar zur Beurteilung der Güte des Querführungssystems zur Verfügung stehen, lassen sich zusätzliche Beurteilungsmaße aus den Messgrößen ableiten.

Standardab-
weichung der Lenk-
geschwindigkeit

Mit der Standardabweichung der Lenkgeschwindigkeit $\sigma_{\dot{\delta}}$ wird die Verteilung der Lenkgeschwindigkeit $\dot{\delta}$ beschrieben:

$$\sigma_{\dot{\delta}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\dot{\delta}_i - \bar{\dot{\delta}})^2} \quad (6.2)$$

Die Standardabweichung ist eine in der Statistik verwendete Größe und ein Maß für die Streuung der Werte einer Variablen um ihren Mittelwert. Je kleiner der Wert, desto komfortabler werden die Lenkbewegungen wahrgenommen. Im Bereich der Fahrerassistenzforschung sind Regelingriffe über den Lenkaktor im Allgemeinen möglichst langsam ausgelegt (Müller u. Rohleder, 2006).

Verlauf des Lenk-
winkelschlags

Der Verlauf des Lenkwinkelschlags wird durch Auswertung des Betrags der Differenz aufeinanderfolgender Lenkwinkel bewertet:

$$I_{|D|} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |\delta(i+1) - \delta(i)| \quad (6.3)$$

Das Maß beschreibt, wie ruhig und gleichmäßig eine Regeleinrichtung den Lenkwinkel generiert. Ist die Lenkradbetätigung wie vorgesehen gleichmäßig, sind die Differenzen aufeinanderfolgender Lenkwinkel gering. Ziel ist es, eine Minimierung des Zahlenwerts anzustreben.

Unter dem sogenannten Ruck in lateraler Richtung wird die zeitliche Ableitung der Querbeschleunigung verstanden. Der maximale Querruck $\dot{a}_{q, \max}$, der während einer Fahrt auftritt, steht dabei als Gütekriterium zur Verfügung. In (Schorn, 2007) wird bei der Durchführung von besonders dynamischen Ausweichmanövern mit einem VW Golf IV bei einer Geschwindigkeit von 14 m/s ein maximaler Querruck von 40 m/s³ ermit-

telt. Autonome Fahrten sollten dagegen weit weniger Querruck aufweisen, um ein komfortables und sicheres Fahrverhalten zu gewährleisten.

Als weiteres Maß zur Beurteilung der Lenkbewegungen wird die Fläche unter dem Lenkgeschwindigkeitsverlauf verwendet:

$$I_F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\dot{\delta}(i)| \quad (6.4)$$

Fläche unter Lenkgeschwindigkeitsverlauf

Kleinere Integralwerte bedeuten weniger Lenkbewegungen und damit einen erhöhten Fahrkomfort.

Auch das Integral über das Quadrat der Differenz aufeinanderfolgender Stellgrößen wird in regelungstechnischen Systemen als Bewertungsmaß verwendet:

$$I_D = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (\delta(i+1) - \delta(i))^2 \quad (6.5)$$

Quadrat der Differenz aufeinander folgender Stellgrößen

Der wesentliche Unterschied zum Gütemaß in Gleichung 6.3 besteht in der unterschiedlichen mathematischen Auswertung des Stellgrößenverlaufs. Um zu beurteilen, wie ruhig und gleichmäßig der Lenkwinkel bei der autonomen Fahrzeugführung ist, wird das Maß aus Gleichung 6.5 in (Maurer, 2000) zur Beurteilung herangezogen.

Auf Basis der dargestellten Beurteilungsmaße für die Fahrzeugführung erfolgt in Kapitel 9 eine Bewertung des in dieser Arbeit vorgestellten Systems zur Realisierung von Fahrentscheidungen in der autonomen Fahrzeugführung.

6.3. Mathematische Beschreibung von Spline-Algorithmen

Bei der Umsetzung manöverübergreifender Fahrentscheidungen in der Trajektorienplanung werden unterschiedliche Spline-Algorithmen eingesetzt. Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die verwendeten Verfahren.

6.3.1. Non-Uniform Rational B-Spline

Bei den sogenannten Non-Uniform Rational B-Splines handelt es sich um mathematische Kurven, die vor allem in der Computergrafik Anwendung

Einsatz in der Computergrafik

finden. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit zur Modellierung nahezu beliebiger Kurven und Formen.

Fortsetzbar,
modifizierbar,
glättend

Innerhalb der Robotik werden B-Splines für die Trajektorienplanung zur Approximation einer Folge von n Punkten verwendet. Von grundlegender Bedeutung sind die Spline-Eigenschaften Fortsetzbarkeit, lokale Modifizierbarkeit und der von der Ordnung abhängende glättende Effekt. Außerdem ist der Spline an den Manöverübergängen in Abhängigkeit von der Spline-Ordnung in mehreren Ableitungen stetig.

Basisfunktionen
bilden Kern

Der B-Spline wird durch eine parametrische Darstellung einer eindimensionalen Kurve $b(u)$ beschrieben, wobei u den Laufparameter⁷ des Splines darstellt. Aus einem Stützpolygon leitet sich ein sogenannter Knotenvektor ab, der die verwendeten Stützpunkte P_i enthält. Kern des B-Splines ist eine sogenannte Basisfunktion $N_{i,e}(u)$, die den Einfluss eines Stützpunktes auf den Verlauf des B-Splines bestimmt und die vom Grad e des verwendeten B-Splines abhängt. Ein Punkt der Kurve $b(u)$ des B-Splines berechnet sich aus der gewichteten Überlagerung benachbarter Stützpunkte:

$$b(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,e}(u) P_i \quad (6.6)$$

Berechnungsvor-
schrift nach de
Boor

Eine verbreitete Berechnungsvorschrift für die Basisfunktion $N_{i,d}(u)$ ist die sogenannte Rekursionsformel nach de Boor (de Boor, 2001), wobei der Grad des B-Splines die Anzahl der Aufrufe der Rekursionsformel bestimmt:

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{falls } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.7)$$

$$N_{i,e}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+e} - u_i} N_{i,e-1}(u) + \frac{u_{i+e+1} - u}{u_{i+e+1} - u_{i+1}} N_{i+1,e-1}(u) \quad (6.8)$$

Anwendung der
Ordnung vier

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein B-Spline vierten Grades verwendet, der nach eigenen Untersuchungen die vergleichsweise besten Glättungseigenschaften für die Anwendung des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens aufweist. In Abhängigkeit der fünf benötigten Stützpunkte

⁷Je nach Darstellung wird meist $u \in [0; 1)$ verwendet.

$P_1..P_5$ wird die Funktion des B-Splines daraus allgemein für die beiden Koordinatenrichtungen abgeleitet:

$$\begin{aligned}
 b(u) = \frac{1}{24} (& P_1 u^4 \\
 & + P_2 ((u+1)^4 - 5u^4) \\
 & + P_3 ((u+2)^4 - 5(u+1)^4 + 10(u)^4) \\
 & + P_4 ((u+3)^4 - 5(u+2)^4 + 10(u+1)^4 - 10u^4) \\
 & + P_5 ((u+4)^4 - 5(u+3)^4 + 10(u+2)^4 - 10(u+1)^4 + 5u^4))
 \end{aligned} \tag{6.9}$$

Das Resultat ist die Parameterdarstellung des Splines durch zwei Funktionen:

$$x(u) = f(P_{1,x}, P_{2,x}, P_{3,x}, P_{4,x}, P_{5,x}, u) \tag{6.10}$$

$$y(u) = f(P_{1,y}, P_{2,y}, P_{3,y}, P_{4,y}, P_{5,y}, u) \tag{6.11}$$

Eine ausführliche Herleitung sowie eine weitere Beschreibung der Besonderheiten der Non-Uniform Rational B-Splines ist in den Veröffentlichungen (de Boor, 2001; Hoschek u. Lasser, 1992; Piegler u. Tiller, 1997; Prautzsch et al., 2002) dargestellt.

6.3.2. Smoothing Splines

Die Glättung von Daten, die nicht die Anforderungen in Bezug auf eine gewünschte Glattheit erfüllen, ist durch den sogenannten Smoothing Spline nach Schoenberg und Reinsch (de Boor, 2001) möglich. Dazu wird der Smoothing Spline durch Minimierung eines quadratischen Gütefunktional für einen kubischen Spline der Form

$$J = p \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\delta y_i} \right)^2 + (1-p) \int_{s_0}^{s_N} (f''(s))^2 ds \tag{6.12}$$

ermittelt. Ziel des Splines ist es, die vorgegebenen Daten einerseits zu approximieren und andererseits zu glätten. Dazu besteht das Gütefunktional J aus zwei Termen: Der erste Term gewichtet an den Stützstellen x_i die Differenz zwischen dem Funktionswert $f(x_i)$ des zu konstruierenden Splines und den ursprünglichen Werten y_i mit dem Ziel, die Daten bestmöglich zu approximieren. Durch Angabe der erwarteten Standardabweichung δy_i wird die Differenz bei Daten mit niedriger Unsicherheit

Herstellen einer
gewünschten
Glätte

Approximation und
Glättung

höher bewertet als bei höherer Unsicherheit. Der zweite Term berücksichtigt über das Integral der quadrierten zweiten Ableitung die gesamte Biegung des Splines, so dass eine Glättung des Verlaufs erreicht wird (Hoschek u. Lasser, 1992). Eine genauere Beschreibung ist in Anhang A zu finden.

Durch die Wahl des Parameters $p \in [0..1]$ wird der Einfluss der beiden Terme auf das Gütefunktional festgelegt. Wird $p = 1$ gewählt, resultiert die Minimierung des Funktional in einer kubischen Splineinterpolation ohne zusätzliche Glättung der Daten (blaue Kurve in Abbildung 6.2). $p = 0$ entspricht einer Ausgleichsgeraden durch die Datenmenge (rote Kurve in Abbildung 6.2).

Parameter p
bestimmt Maß
der Glättung

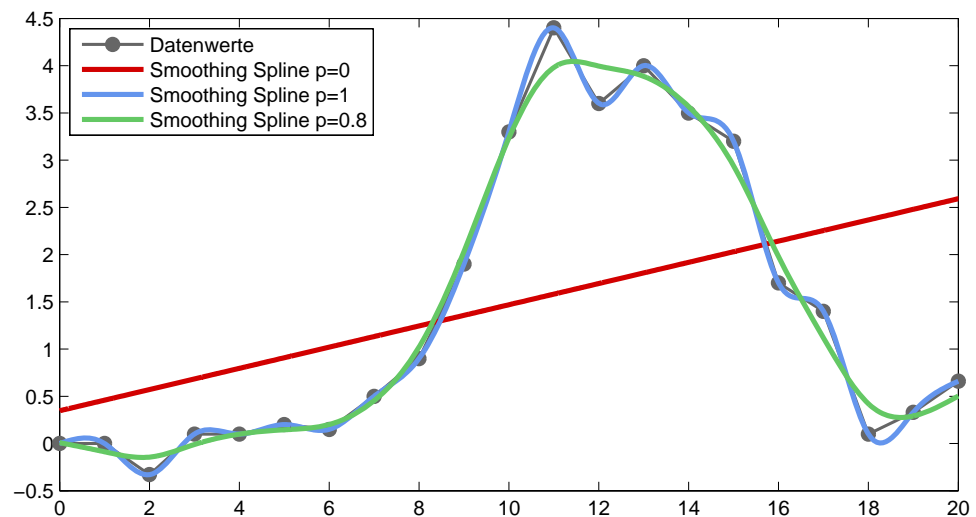


Abbildung 6.2.: Einfluss des Glättungsfaktors p auf den Verlauf eines Smoothing Splines

6.4. Manöverselektive Trajektorienplanung

In Abschnitt 5.3 wurde beispielhaft gezeigt, dass die klassische manöverbasierte Fahrzeugführung einzelne Abschnitte selektiv behandelt und abschließend zur Gesamttrajektorie zusammensetzt. In der Literatur gibt es diverse Trajektorienplanungsverfahren, die sich für eine manöverselektive Darstellung von Fahrentscheidungen eignen. Im Folgenden werden zwei Verfahren ausgeführt, die bereits in unterschiedlichen Testträgern angewendet wurden und im weiteren Verlauf für einen Vergleich von manöverselektiver und manöverübergreifender Umsetzung von Fahrentscheidungen dienen.

Manöverselektive
Darstellung
von Fahrent-
scheidungen

6.4.1. Sigmoidbasierte Darstellung

Bereits Anfang der 1990er Jahre stellten H.-H. Nagel und W. Enkelmann ein Konzept vor, das autonome Fahrten in insgesamt 17 Fahrmanöver⁸ unterteilt. Damit wurde ein System angestrebt, dessen Fahraktionen an das menschliche Fahrverhalten angelehnt sind (Nagel u. Enkelmann, 1991). In (Tölle, 1996) ist die Umsetzung einiger dieser Fahrmanöver in einem Versuchsträger beschrieben. Statt einer Abbildung der Fahrmanöver in Trajektorien wurden aus erkannten Fahrbahnbegrenzungen und mittels Kalmanfilterung die Steuerungsgrößen für das Fahrzeug bestimmt. Fahrstreifenwechsel auf Autobahnen ergaben sich beispielsweise dadurch, dass auf die Fahrbahnmarkierungen des benachbarten Fahrstreifens umgeschaltet wurde, so dass der Querführungsregler den seitlichen Versatz korrigieren konnte.

Aufbauend auf diesen Vorarbeiten realisierte W. Tölle einen maschinellen Kopiloten und reduzierte die Menge der erforderlichen Fahrmanöver durch das Einführen eines virtuellen Objektes auf neun⁹. Damit wurde das Manöver „Folgen eines Fahrzeugs“ als Spezialfall des Manövers „Straßenverlauf folgen“ angesehen. Bei einfachen Fahrmanövern wie „Anfahren“ oder „Folgen“ ergab sich die Krümmung der Straße aus Algorithmen zur Bildverarbeitung und daraus wiederum der Lenkwinkel, so dass für diese Manöver weiterhin keine Trajektorie notwendig war. Bei komplexeren Fahrmanövern wurde innerhalb des zur Verfügung stehenden Planungsbereiches eine Trajektorie auf Basis der Sigmoidfunktion geplant:

$$f(s) = \frac{\xi}{1 + e^{-\eta s}} \quad (6.13)$$

s wird als Abszissenwert bezeichnet und stellt den Laufparameter für die Bogenlänge dar. Die beiden Parameter ξ und η beeinflussen den Verlauf der Sigmoiden. Während ξ den Skalierungsfaktor der Ordinate

Abbildung
komplexer
Fahrmanöver
durch
Sigmoiden

⁸Die 17 Fahrmanöver sind nachfolgend aufgelistet: Anfahren, Straßenzug folgen, eine Kreuzung überqueren, Fahrstreifenwechsel nach links/rechts, links/rechts abbiegen, am rechten Straßenrand anhalten, rückwärts fahren, Kehre links/rechts, Fahrtrichtung umkehren, Annähern an einen sich vor dem Fahrzeug befindenden Gegenstand, Überholen, vor einem Gegenstand anhalten, links/rechts an einem Gegenstand vorbeifahren, hinter einem anfahrenden Fahrzeug anfahren, einem Fahrzeug folgen, in eine Parklücke einfahren, aus einer Parklücke herausfahren (Nagel u. Enkelmann, 1991).

⁹Die neun Fahrmanöver waren: Anfahren, Folgen, Annähern, Passieren, Kreuzung überqueren, Fahrstreifenwechsel, Abbiegen, Umkehren, Parken (Tölle, 1996).

bezeichnet, wird mit η die maximale Änderungsrate der sigmoidalen Größe skaliert. Die Sigmoidfunktion erreicht ihre Grenzwerte 0 und ξ für $s \rightarrow -\infty$ und $s \rightarrow \infty$.

Abbildung 6.3 zeigt exemplarisch den Trajektorien- und Lenkwinkelverlauf eines durch eine Sigmoide dargestellten Abbiegemanövers. Eine weitergehende Beschreibung der manöverbasierten Fahrzeugführung mit Sigmoiden ist in (Tölle, 1996) beschrieben.

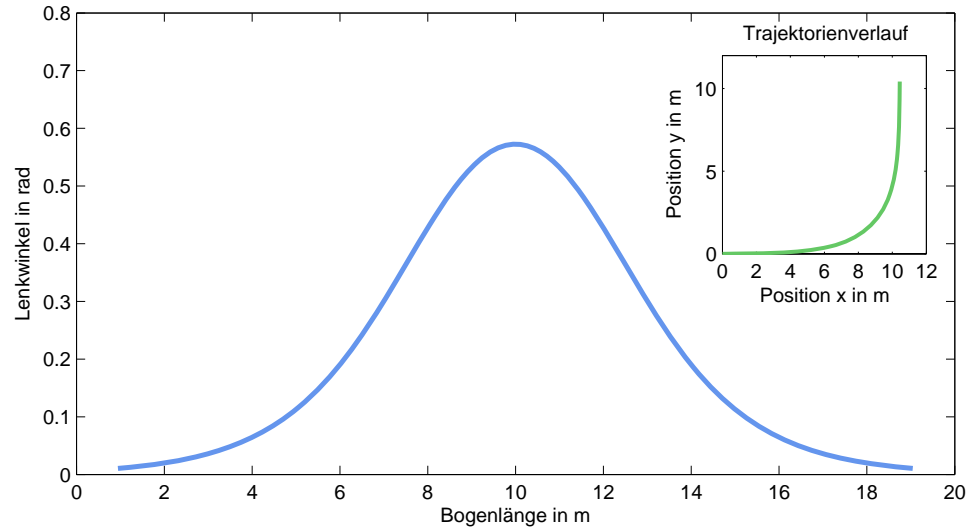


Abbildung 6.3.: Exemplarischer Lenkwinkel- und Trajektorienverlauf bei Darstellung eines Abbiegemanövers durch eine Sigmoidfunktion

6.4.2. Splinebasierte Darstellung

Anstelle einer Abbildung von Fahrmanövern durch Sigmoiden sind splinebasierte Trajektorienplanungen sehr verbreitet. Ein sehr bekannter Algorithmus ist der an der Universität Parma, Italien, entwickelte Quintic G^2 -Spline (Piazzini u. Guarino Lo Bianco, 2000). Er basiert auf sogenannten η -Splines, die derart parametrisiert werden, dass sie eine beliebige Punktmenge interpolieren und dabei die Differenzierbarkeit zweiten Grades erreichen. Als Basis dient ein Spline fünfter Ordnung:

Quintic G^2 -Spline

$$x(u) = x_a + x_b u + x_c u^2 + x_d u^3 + x_e u^4 + x_f u^5 \quad (6.14)$$

$$y(u) = y_a + y_b u + y_c u^2 + y_d u^3 + y_e u^4 + y_f u^5 \quad (6.15)$$

Die Parameter x_a bis y_f sind Funktionen eines Parametervektors $\underline{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2 \ \eta_3 \ \eta_4]^T$ mit $\underline{\eta} \in \mathcal{H}$, $\mathcal{H} = \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Außer der Position

wird zur Berechnung des Splines die erste und zweite Ableitung benötigt. Die Kurvenfamilie $\mathbf{p}(u; \eta)$ umfasst alle möglichen Lösungen, d.h. es gibt keine weiteren Kurven, die zwei Punkte bei gegebener Steigung und Krümmung interpolieren.

Quintic G^2 -Splines sind in der Lage, sowohl Geraden und Klothoiden als auch Kreisbögen nachzubilden. Über den Parametervektor $\underline{\eta}$ wird der Spline in seiner Ausprägung beeinflusst. Die Werte η_1 und η_2 beeinflussen die Steigung und Krümmung, mit der sich die Kurve von den vorgegebenen Randbedingungen ändert. Sehr groß gewählte Werte verhindern eine rasche Änderung zu Beginn und Ende des Splines. Demgegenüber beeinflussen die Werte η_3 und η_4 die Krümmungsänderung. Abbildung 6.4 zeigt exemplarisch den Lenkwinkelverlauf eines durch einen Quintic G^2 -Spline dargestellten Fahrstreifenwechsels.

Abbildung von Geraden, Klothoiden und Kreisbögen möglich

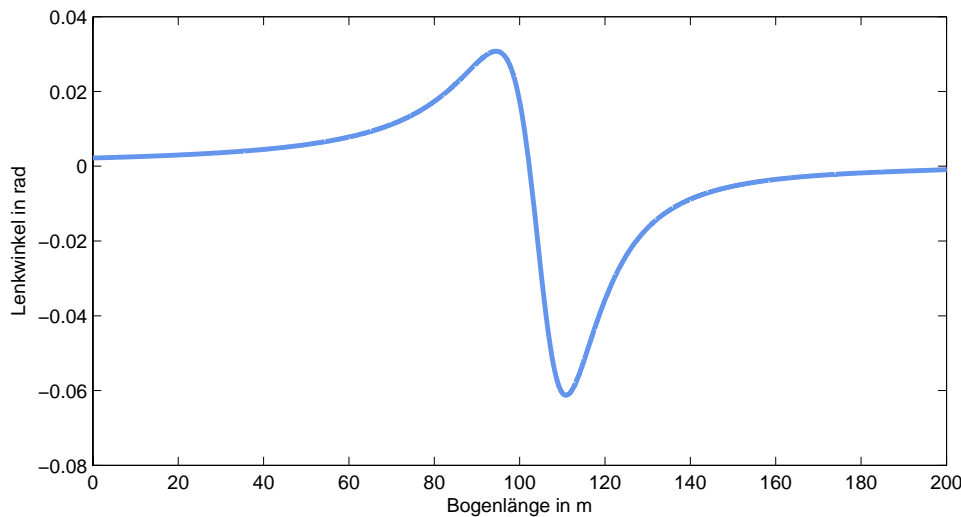


Abbildung 6.4.: Lenkwinkelverlauf bei Darstellung eines Fahrstreifenwechsels durch einen Quintic G^2 -Spline

Eine Methode zur Bestimmung der optimalen Parameter wird in (Guarino Lo Bianco u. Piazzini, 2000) vorgestellt. Das Optimierungsproblem besteht in der Suche des Parametervektors $\underline{\eta}$, der die maximale Krümmung entlang des Splines minimiert:

$$\min_{\underline{\eta} \in \mathcal{H}} \max_{u \in [0,1]} \left| \frac{d\kappa}{ds}(u) \right| \quad (6.16)$$

Zur Lösung des Minimierungsproblems wird entweder der sogenannte „Sequential Quadratic Programming“-Algorithmus oder ein hybrider Algorithmus zur beschränkten Minimumsuche vorgeschlagen (Guarino

Lo Bianco u. Piazzì, 2001). Da beide Methoden im Allgemeinen für Echtzeitanwendungen nicht geeignet sind, müssten für derartige Systeme vorweg berechnete Werte in einer Tabelle bereitgestellt werden. Eine weitergehende Beschreibung findet sich in den zuvor genannten Veröffentlichungen.

7 Fahrzeugarchitektur

Das folgende Kapitel beschreibt die beiden an der Technischen Universität Braunschweig entstandenen Testträgergenerationen für autonomes Fahren in städtischer Umgebung sowie die funktionale Systemarchitektur, wie sie im Auftaktszenario des Stadtpilot-Projekts eingesetzt wurde.

7.1. Beschreibung der Versuchsträger

Sowohl Caroline als auch der neuen Testträger-Generation Henry und Leonie (Abbildung 7.1) dient der Volkswagen Passat Variant der Baureihe B6 als Basis. In der Art der Um- und Anbauten gibt es allerdings Unterschiede.

Volkswagen Passat
Variant als Basis

Zu den Kriterien, die zur Auswahl und Verbauweise der unterschiedlichen Hardwarekomponenten führten, gehörten neben der Realisierung der eigentlichen Funktion auch der Energieverbrauch, die Wärmeenergieerzeugung und der Verbrauchsbedarf, wobei sich die gesetzten Schwerpunkte bei den Fahrzeugen unterscheiden. Während in der Urban Challenge eine Maximierung des Detektionsbereiches der Sensoren, eine geringe Wärmeenergieerzeugung angesichts der wüstenähnlichen Umgebungsbedingungen und ein möglichst niedriger Energieverbrauch aufgrund einer begrenzten Möglichkeit zur Energieerzeugung im Vordergrund standen, ist bei den Stadtpilot-Fahrzeugen eine stärkere Integration der Komponenten im Sinne der Straßenverkehrsordnung angestrebt. Vor allem durch die auffallend montierten Laserscanner an Carolines Front war es nicht möglich, eine Straßenzulassung zu erhalten. Da im Projekt Stadtpilot eine autonome Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr als Projektziel formuliert ist, sind zur Erlangung einer entsprechenden Zulassung feste Rahmenbedingungen an den Fahrzeugaufbau vorgegeben. Dazu gehört, dass Anbauten nicht aus der Fahrzeugkontur herausragen sowie scharfe Kanten vermieden werden.

Unterschiedlicher
Schwerpunkt beim
Fahrzeugaufbau

Während Caroline ein 2.0-FSI-Motor mit 110 kW als Antrieb diente, fiel bei Henry und Leonie die Wahl auf einen 2.0-TDI mit 103 kW. Die Wahl dieser Motorisierung ermöglicht es, eine zweite Lichtmaschine

vollständig im Motorraum zu integrieren. Einer Schwachstelle des Urban-Challenge-Fahrzeugs konnte damit von Anfang an begegnet werden.



Abbildung 7.1.: Versuchsträger Caroline aus der Urban Challenge (links) und Versuchsträger Leonie aus dem Projekt Stadtpilot (rechts)

7.1.1. Aktorik

E-Gas-Schnitt-
stelle, Brems-
booster und
APA-Lenkung

Der Volkswagen Passat Variant bietet sich als Trägerplattform an, da dieser bereits serienmäßig die wesentlichen Voraussetzungen zur elektronischen Ansteuerung der Aktorik ermöglicht. Alle Testträger verfügen über eine elektronisch ansteuerbare E-Gas-Schnittstelle und einen Bremsbooster für die autonome Längsführung sowie die elektromechanische APA-Lenkung¹ (Jablonski et al., 2008) zur Realisierung des elektronischen Lenkeingriffs. Allein der Bremsbooster ist zunächst nicht serienmäßig verbaut gewesen. Die Verwendung der serienmäßig verbauten Lenkung bietet im Vergleich zu nachgerüsteten externen Stellmotoren vor allem im Hinblick auf die Zuverlässigkeit, die Dynamik und die Anbindung an das Gesamtsystem grundlegende Vorteile.

Direkt-Schalt-
Getriebe

Der Wählhebel des Automatikgetriebes im Testträger Caroline benötigt für den Wechsel zwischen den einzelnen Getriebepositionen einen Linearaktuator. Die Ansteuerung des Direkt-Schalt-Getriebes (DSG) in Leonie ist direkt über den fahrzeugeigenen CAN-Bus möglich (Abbildung 7.2).

7.1.2. Sensorik

Die aktuell im Testträger Leonie verbaute Sensorik basiert zunächst auf der in der Urban Challenge verwendeten Hardware, deren Verwendung aus dem Regelwerk des Wettbewerbs abgeleitet war (Effertz, 2009) und

¹ Achs-Paralleler-Antrieb



Abbildung 7.2.: Linearaktuator in Caroline (links) und Direktschaltgetriebe in Leonie (rechts) zur Wahl der Getriebeposition

für weitere Forschungsvorhaben wie dem Stadtpilot-Projekt zur Verfügung steht. Damit ist dieser Teil der Sensorik zunächst nicht aus den Bedingungen der Stadtringumgebung abgeleitet und die Notwendigkeit einer Anbindung an das Gesamtsystem zu prüfen. In der Verbauart am Fahrzeug gibt es zudem grundlegende Unterschiede zum Urban Challenge Fahrzeug Caroline. Zur Erfüllung der Anforderungen autonomer Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring ist die in der Urban Challenge verwendete Hardware zusätzlich durch einige neuere Sensortypen ergänzt.

Insgesamt stehen drei Mehrebenenlaserscanner zur Verfügung, durch die bereits ein wesentlicher Teil der erforderlichen Sensorabdeckung erreicht werden kann. An der Fahrzeugfront sind zwei Scanner der Firma Ibeo in der Bauform Alasca XT verbaut. Abbildung 7.3 zeigt die unterschiedliche Integration am Fahrzeug der verschiedenen Testträgergenerationen. Der bisher am Fahrzeugheck verwendete Lidar-Scanner der älteren LDML-Bauart wurde durch einen neuen Ibeo Lux Sensor ersetzt.

Drei Ibeo Mehrebenenlaserscanner

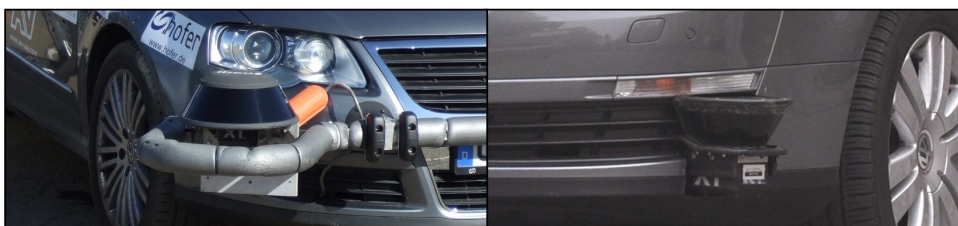


Abbildung 7.3.: Verbau der Ibeo Alasca XT Laserscanner an Caroline (links) und Leonie (rechts)

Das Sensor-Setup ist im vorderen und hinteren Bereich durch je einen Lidar-Sensor vom Typ IDIS der Firma Hella ergänzt, der bei einem Öffnungswinkel von zwölf Grad eine Reichweite von bis zu 200 Meter er-

Zwei Hella IDIS Lidar-Sensoren

reicht. Die mehrstrahligen Lidar-Sensoren bieten die Möglichkeit, sowohl die Redundanz als auch die Reichweite des Gesamtsystems zu erhöhen.

Ein Hella IDIS-2.0
Lidar-Scanner

Ergänzt wurde das Urban-Challenge-Konzept zusätzlich durch einen IDIS Lidar-Scanner der zweiten Generation von Hella. Der IDIS-2.0 Sensor zeichnet sich durch die Möglichkeit zur freien Konfiguration des Abdeckungsbereiches mit den 91 zur Verfügung stehenden Sensorkanälen aus, so dass eine Konfiguration mit 91 Grad oder 162 Grad Erfassungsbereich eingestellt werden kann (Boehlau et al., 2009).

Vier SMS 24-
GHz-Radare

Insgesamt vier 24 GHz-Radare für den Nah- und Mittelbereich der Firma SMS sind im Front- und Heckbereich des Fahrzeugs verbaut. Zum einen wird damit der Totwinkelbereich des Fahrzeugs abgedeckt, zum anderen ermöglicht das alternative Messprinzip eine Absicherung des Wahrnehmungssystems (Abbildung 7.4).



Abbildung 7.4.: Verbauposition eines Hella IDIS (links) und eines SMS UMRR Radarsensors (Mitte) an Caroline und Leonie (rechts), an Leonie zusätzlich durch einen Hella IDIS-2.0 Sensor ergänzt

Alle bisher vorgestellten Sensoren werden via CAN-Bus an das Gesamtsystem angebunden und sind mit einer eigenen, internen Objektverarbeitung ausgestattet.

Velodyne 64-
Ebenen-Laser-
scanner HDL64-
Series 2

Mit dem Aufbau des Versuchsträgers Leonie wurde die Sensorausstattung um einen 64-Ebenen-Laserscanner HDL64-Series 2 der Firma Velodyne ergänzt, der auf dem Dach des Fahrzeugs montiert in einem Abdeckungsbereich von 360 Grad eine theoretische Reichweite von bis zu 120 m erreicht. Die im Vergleich zu den übrigen Sensoren äußerst große Datenmenge von 4,3 MB pro Sekunde wird über eine Ethernet-Schnittstelle nutzbar gemacht.

Ein System, bestehend aus einer Farbkamera mit zwei industriellen Laserscannern der Firma Sick, ermöglichte in der Urban Challenge eine Fahrbereichserkennung, die unter anderem stärkere Unebenheiten der Fahrbahn erkennen konnte. Auf ein derartiges System wird für das Stadtring-Szenario verzichtet, da die Fahrbahn im Allgemeinen keine stärkeren Unebenheiten aufweist. Stattdessen ist das Stadtpilot-



Abbildung 7.5.: System zur Fahrbereichserkennung an Caroline (links), Sick-Scanner (Mitte) und Velodyne Laserscanner HDL64-Series 2 (rechts) an Leonie

Sensorkonzept durch mehrere Sick-Laserscanner der Nachfolgeneration ergänzt, um über die Reflektivitätswerte erkannte Fahrstreifen mit den Informationen einer hochgenauen Karte zu verbinden (Budach, 2010). Ziel ist die Erhöhung der Positionsgenauigkeit des Fahrzeugs (Abbildung 7.5).

Industrielle SICK-
Laserscanner

In Abhängigkeit des jeweiligen Szenarios und den daraus abgeleiteten Fähigkeiten des Testträgers besteht die Möglichkeit, eine Untermenge aus dem Sensorsetup zu bilden. Für die im Auftaktszenario im Nordosten des Stadtrings dargestellten Fahrfähigkeiten hat sich beispielsweise die Qualität der maschinellen Wahrnehmung auf Basis des Hella IDIS-2.0 Sensors als ausreichend erwiesen.

Abbildung 7.6 zeigt die Erfassungsbereiche der einzelnen an Leonie verbauten Sensoren in einer Gesamtdarstellung.

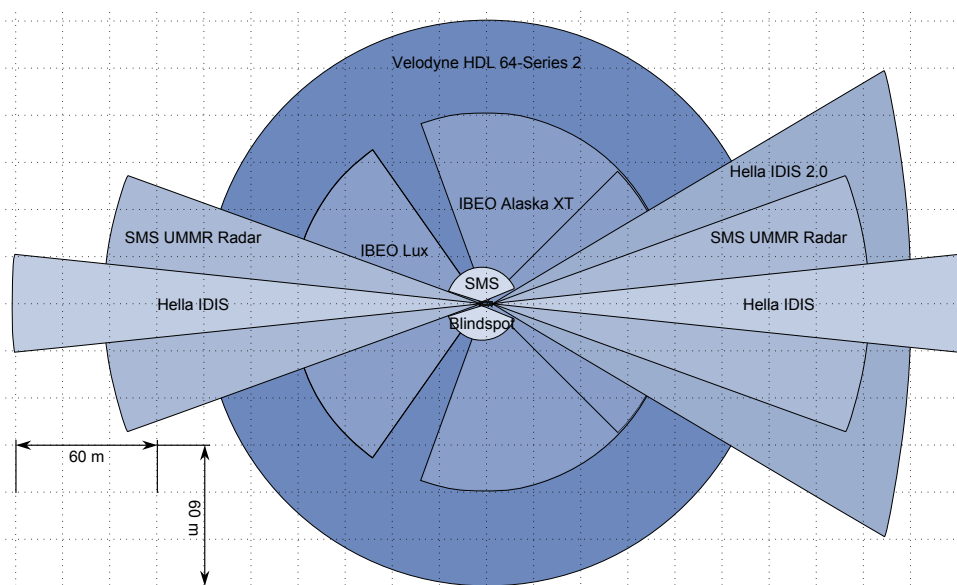


Abbildung 7.6.: Erfassungsbereiche der an Leonie verbauten Sensoren

7.1.3. Ortungssystem

iMAR iTrace
RT200

Sowohl in Caroline als auch in Leonie findet eine iTrace RT200 der Firma iMAR Anwendung. Laut Hersteller-Angaben zeichnet sich das System besonders durch die in Echtzeit bidirektionale online INS/GPS-Filterung aus. Das System stellt Positionsgrößen (Position, Geschwindigkeit) und kinematische Messgrößen (Beschleunigungen, Drehraten, Lagewinkel) mit einer hohen Genauigkeit zur Verfügung.

SAPOS HEP-
Korrekturdaten

In der Urban Challenge wurden zusätzlich die Korrekturdaten des OmniSTAR VBS²-Dienstes verwendet, die bei entsprechender Satellitensichtbarkeit eine submetergenaue Positionierung erlauben. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,4 % (2σ -Umgebung) entspricht dies einer erreichbaren Genauigkeit von deutlich unter einem Meter. Mit der Wahrscheinlichkeit von 99,7 % (3σ -Umgebung) liegt der maximale Fehler im Bereich von einem Meter. Die erlangte Genauigkeit war in der Urban Challenge aufgrund der toleranten Umgebungsbedingungen in Form von breiten Straßen hinreichend. Im Rahmen des Stadtpilot-Projekts wird stattdessen der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung³ verwendet, um den verschärften Bedingungen der Stadtring-Umgebung gerecht zu werden. Dieser Dienst stellt Korrekturdaten zur Verfügung, die auf Basis von Referenzstationen ermittelt werden und eine genauere Positionierung erlauben. Mit dem sogenannten HEP⁴-Service ist auch unter dynamischen Bedingungen eine Genauigkeit von 2-3 cm möglich. Dafür ist die uneingeschränkte Sicht zu den Satelliten allerdings Voraussetzung. Bereits kurze Unterbrechungen durch Abschattungen führen dazu, dass diese sogenannte Phasenlösung nicht mehr funktioniert. Daher kann die Eigenpositionierung zusätzlich über mit SICK-Laserscannern erkannte Fahrstreifenmarkierungen in Kombination mit einem georeferenzierten Luftbild gestützt werden.

Georeferenziertes
Luftbild

7.1.4. Energiekonzept und Rechnerplattform

Einige Systeme konnten in der Urban Challenge nicht zum Einsatz kommen, da aufgrund einer negativen Energiebilanz ansonsten ein Ausfall gedroht hätte. In den neuen Testträgern Henry und Leonie wurde daher das Energiekonzept durch eine zweite Lichtmaschine ergänzt. Beide

Verbau einer zweiten vollintegrierten
Lichtmaschine

²Virtual Base Station

³SAPOS

⁴Hochpräzise Echtzeit-Positionierung

Generatoren arbeiten im gleichen Stromkreis, so dass die verfügbare elektrische Leistung im Vergleich zu Caroline um ungefähr 1 kW erhöht werden konnte. Die grundlegenden, in die Fahrzeugarchitektur eingreifenden Umbauten zum autonomen Fahrzeug wurden dabei in allen Testträgern durch die Volkswagen AG ermöglicht.

Beim Aufbau des Testträgers Caroline wurde großer Wert auf die Verwendung von Rechneinheiten gelegt, die explizit für einen Einsatz in der Fahrzeugtechnik vorgesehen sind. Sechs sogenannte Bressner Automotive Computer kamen daher in der Urban Challenge zum Einsatz, die sich durch eine geringe Energieaufnahme und den Verzicht auf bewegliche Teile auszeichneten. Jede Rechneinheit stellte die Grundlage für ein abgeschlossenes Modul dar, so dass die Gesamtfunktionalität durch die Verbindung der einzelnen Einheiten via Ethernet in einer verteilten Kommunikationsarchitektur erreicht wurde. Während der Urban

Automotive Computer als Carolines Rechenzentrum



Abbildung 7.7.: Rechnersysteme und Steuergeräte: Caroline (links), Leonie (Mitte, rechts)

Challenge hat sich allerdings herausgestellt, dass auch die Umsetzung mit Standard-Serverhardware vieler anderer Teams eine ähnliche Verlässlichkeit zeigte, zusätzlich aber eine höhere Flexibilität sowie darüber hinaus eine größere Rechenleistung bieten konnte. In den Stadtpilot-Fahrzeugen wird daher ebenfalls auf Servertechnologie zurückgegriffen (Abbildung 7.7). Bei gleicher Energieaufnahme wird damit die doppelte Rechenleistung nutzbar gemacht.

Im Unterschied zu der in der Urban Challenge selbstentwickelten Middleware werden bei Henry und Leonie kommerzielle Softwareprodukte verwendet. Zum Einsatz kommt das in der industriellen Fahrerassistenzentwicklung verwendete ADTF⁵ (Schabenberger, 2007) in Verbindung mit der RTI DDS⁶ Middleware (RTI, 2010).

Abschließend stellt Tabelle 7.1 die wichtigsten Merkmale der ersten und zweiten Testträgergeneration noch einmal zusammen.

Eigenentwickelte Middleware durch kommerzielle Software ersetzt

⁵Automotive Data and Time-triggered Framework

⁶Real-Time Innovations Data Distribution Service

Tabelle 7.1.: Gegenüberstellung der Urban-Challenge- und Stadtpilot-Testträger an der Technischen Universität Braunschweig

<i>Urban Challenge</i>	<i>Stadtpilot</i>
Testträgerplattform	
Volkswagen Passat Variant B6	Volkswagen Passat Variant B6
2.0 FSI-Motor, 110 kW	2.0 TDI-Motor, 103 kW
Aktorik	
E-Gas Schnittstelle	E-Gas Schnittstelle
Elektronischer Bremsbooster	Elektronischer Bremsbooster
Elektromechanische APA-Lenkung	Elektromechanische APA-Lenkung
Externer Linearschaltaktuator	Ansteuerbares Direktschaltgetriebe
Sensorik	
Zwei Ibeo Alasca XT	Zwei Ibeo Alasca XT ^a
Ibeo LDML	Ibeo Lux ^a
Vier SMS 24 GHz-Radare	Vier SMS 24 GHz-Radare ^a
Zwei Hella IDIS	Zwei Hella IDIS ^a
	Hella IDIS-2.0
	Velodyne HDL64-Series2 ^a
Farbkamera	
Zwei Sick Laserscanner	
Ortung	
iMAR iTrace RT200	iMAR iTrace RT200
Omnistar Korrekturdaten	SAPOS Korrekturdaten
	Zwei Sick Laserscanner ^a
	Georeferenziertes Luftbild ^a
Energiekonzept, Rechnerplattform	
Sechs Bressner Automotive Computer	Serverrechnercluster
	Zusätzliche Lichtmaschine
Eigenentwickeltes Softwareframework	Kommerzielle Softwareprodukte

^aWie in Abschnitt 7.1.2 dargestellt, wurde dieser Teil der Sensorik im Rahmen des Auftaktszenarios nach Abschnitt 4.2.2 nicht verwendet und ist daher in dieser Darstellung in grau dargestellt.

7.2. Systembeschreibung

Bei der Realisierung der Fahrzeugführung durch ein autonomes Straßenfahrzeug werden die Aufgaben des Menschen durch ein technisches System übernommen. Die Funktionsweise eines solchen Systems zur Fahrzeugführung lässt sich durch eine funktionale Systemarchitektur beschreiben.

7.2.1. Funktionale Systemarchitektur

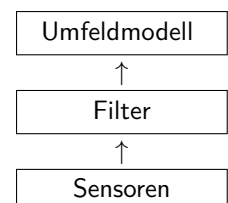
Die Abbildung 7.8 stellt die funktionale Systemarchitektur des autonomen Straßenfahrzeugs Leonie für autonomes Fahren in innerstädtischen Szenarien dar, wie sie im Auftaktszenario nach Abschnitt 4.2.2 verwendet wurde. Die Architektur ist prinzipiell offen für Erweiterungen, so dass sie auch für zukünftige Szenarien und Testträgergenerationen des Stadtpilot-Projekts verwendet werden kann.

Wie in Abbildung 7.8 gezeigt, sind die Module der im Versuchsträger Leonie umgesetzten Architektur in vier verschiedene Schritte zur Fahrzeugführung untergliedert: einer Wahrnehmung, einer Situationswahrnehmung, einer Aktionsplanung und einer Ausführung. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Module, die im Auftaktszenario verwendet wurden.

Die Systeme zur maschinellen **Wahrnehmung** sowie das bereits vorab bekannte A-Priori-Wissen in Form einer digitalen Karte der Umgebung bilden die Grundlage der autonomen Fahrzeugführung. Mit Hilfe der Sensordaten wird den nachfolgenden Modulen ein Modell der Umgebung bereitgestellt, sowie die Aufgabe der Positionierung übernommen. Die maschinelle Wahrnehmung der Architektur in Abbildung 7.8 besteht aus der Hardware zur Detektion des Umfeldes und zur Bestimmung der Eigenposition (vgl. Abschnitt 7.1.2 und 7.1.3), aus Filtern zur Objektgenerierung und Kalmanfiltern zur Fusionierung von Inertialsensorik und DGPS. Eine Verbesserung der Eigenposition des Fahrzeugs, die zunächst aus der gekoppelten DGPS-Trägheitsplattform bestimmt wird, erfolgt durch die Kombination mit einer digitalen Karte im Modul Ortungsfusion.

Die durch die maschinelle Wahrnehmung gewonnenen Daten geben ein elektronisches Datenabbild der aktuellen Fahrszene wieder. Die Funktionsmodule zur **Situationswahrnehmung** übernehmen die Aufgabe, alle diese zur Verfügung stehenden Informationen im Gesamtkontext

Wahrnehmung:



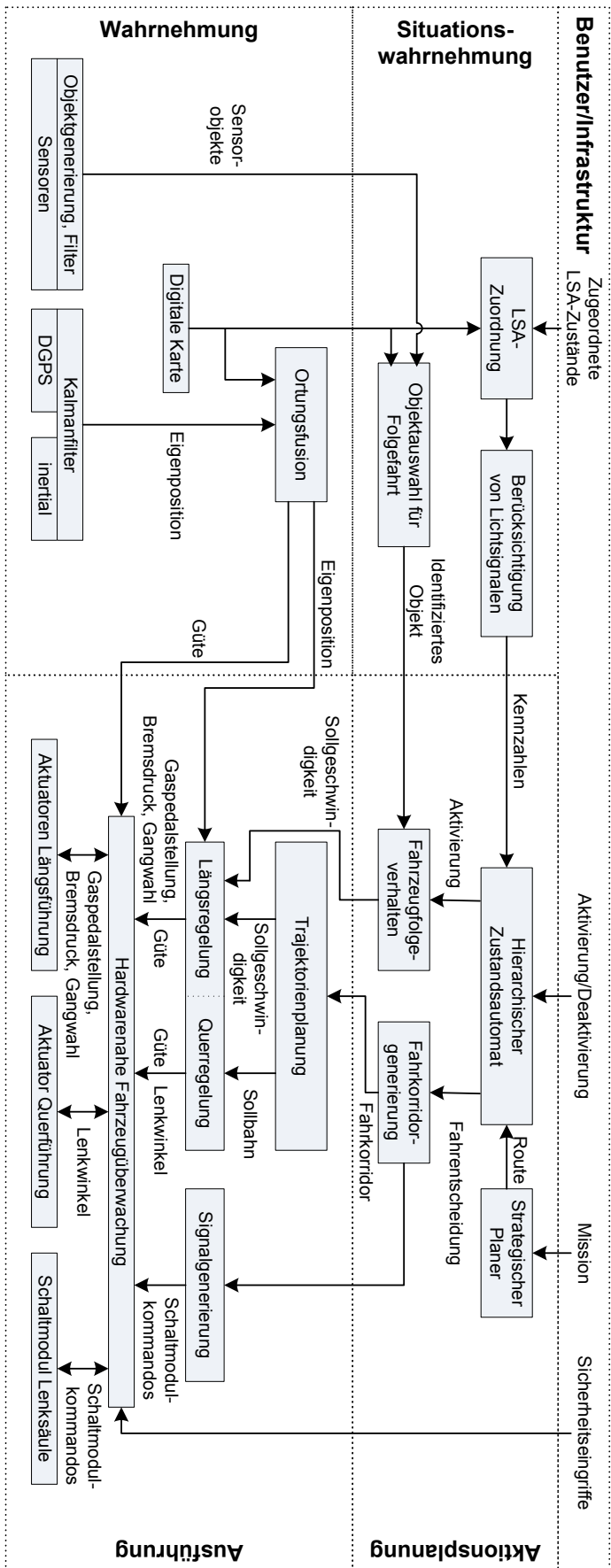


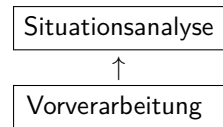
Abbildung 7.8.: Funktionale Systemarchitektur für autonome Straßenfahrzeuge in städtischen Szenarien, wie sie im Auftaktszenario nach Abschnitt 4.2.2 verwendet wurde

auszuwerten. Ziel ist es, die Auswirkungen der Szene in Hinblick auf das Erreichen des eigenen Ziels zu interpretieren. Verschiedene Teilmodule nehmen sich der Analyse unterschiedlicher Teilaspekte der Gesamtszene an. Die Vorbereitung der Funktionalität der Folgefahrt erfolgt im Modul „Objektauswahl zur Folgefahrt“, in dem das Objekt identifiziert wird, das zur Folgefahrt herangezogen wird. Die Informationen über die Zustände der Lichtsignalanlagen werden zunächst über eine Benutzeroberfläche in das System eingegeben, der codierten Position der Lichtsignalanlage zugeordnet (Modul „LSA-Zuordnung“) und schließlich Kennwerte für eine Reaktion auf die Signalfarbe bestimmt (Modul „Berücksichtigung von Lichtsignalanlagen“). Im weiteren Projektverlauf wird eine Übermittlung über eine drahtlose Kommunikation erfolgen. Eine Beschreibung der Funktionalitäten weiterer Teilmodule u.a. für die Durchführung von Fahrspurwechseln und Abbiegevorgängen an Kreuzungen ist in (Scheide, 2009) zu finden. Auf eine detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet, da diese Teilmodule im Auftaktszenario nicht verwendet wurden.

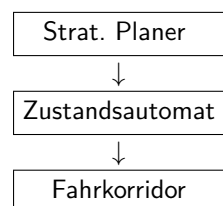
In der **Aktionsplanung** erfolgt schließlich eine Auswertung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Fahrmöglichkeiten. Es wird die für das Fahrzeug durchzuführende Aktion unter Berücksichtigung der strategischen Planung ermittelt, die wiederum die Fahrroute in Abhängigkeit der Mission und des Straßennetzes bestimmt. Über einen hierarchischen Zustandsautomaten werden die verschiedenen analysierten Aspekte der Fahrszene ausgewertet und in eine Entscheidung überführt. In der im Auftaktszenario verwendeten Ausführung berücksichtigt der hierarchische Zustandsautomat die Zustände der Lichtsignalanlagen, aktiviert das Fahrzeugfolgeverhalten und generiert den erforderlichen Fahrkorridor für die Trajektorienplanung auf Basis der Fahrroute. Der Korridor repräsentiert dabei einen Bereich, in dem sich das Fahrzeug aufhalten darf, und gibt zusätzlich die Sollgeschwindigkeit vor. Die Umsetzung wird im Verlauf dieses Kapitels näher beschrieben. Das Modul „Fahrzeugfolgeverhalten“ bestimmt die Sollgrößen für die Längsregelung, um eine Folgefahrt im Stadtverkehr zu ermöglichen. Weitere Funktionalitäten, die über das Auftaktszenario hinausgehen, sind in (Heck, 2009) beschrieben.

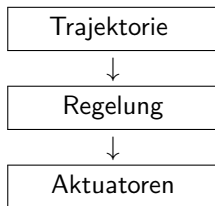
Abschließend erfolgt die **Ausführung** der vorgegebenen Fahraufgabe durch entsprechende Aktorikbefehle. Innerhalb des durch die Entscheidungseinheit vorgegebenen Fahrkorridors wird eine manöverübergreifende, in Bezug auf Querbeschleunigung und Lenkaktivität optimierte

Situations- wahrnehmung:



Aktionsplanung:



Ausführung:

Trajektorienplanung vorgenommen. An dieser Stelle im System ist das eigentliche Fahrmanöver den Umsetzungsmodulen unbekannt, so dass die Entscheidungen unabhängig vom Fahrmanöver realisiert werden. Die Technik zur Generierung der manöverübergreifenden Trajektorien innerhalb eines vorgegebenen Fahrkorridors ist in Kapitel 8 detailliert beschrieben. Getrennte Regelkreise für die Quer- und Längsführung berechnen die Steuerbefehle für die Aktoren zur Umsetzung der Solltrajektorie. Zur Bestimmung der Regelabweichungen wird die Sollposition mit der durch die maschinelle Wahrnehmung bestimmten Ist-Position abgeglichen. Die von der Entscheidungsinstanz geforderten Signalkommandos wie beispielsweise die Ansteuerung des Blinkers werden in einem Parallelzweig an das Schaltmodul der Lenksäule übergeben.

7.2.2. Entkoppelte Entscheidungsumsetzung

Unabhängige
Umsetzung
von Fahrent-
scheidungen

In der Analyse der Stadtpilot-Umgebung in Kapitel 5 ist dargestellt, dass die Umgebungsbedingungen des Stadtring-Szenarios sehr vielfältig sind und daher nicht ausschließlich durch eine rein manöverbasierte Fahrzeugführung abgebildet werden. Stattdessen ist es sinnvoll, manöverübergreifend zu planen und zu optimieren. Daraus resultiert die Notwendigkeit einer Entscheidungsumsetzung, die unabhängig vom Fahrentscheideransatz beliebige Fahraktionen realisiert. Die Entscheidungsfindung bildet die Fahraktionen daher in einer Datenstruktur in Form eines Fahrkorridors ab, so dass eine vollständige Entkopplung der Entscheidungsinstanz von der finalen Trajektorienplanung und Fahrzeugregelung erfolgt. Durch die Entkopplung wird die Umsetzung einer Fahraktion unabhängig von dessen Findungsprozess und bietet die Möglichkeit zur manöverübergreifenden, fahrdynamisch optimierten Entscheidungsumsetzung.

Abbildung 7.9 zeigt den Aufbau der verwendeten Datenstruktur, die Entscheidungen durch einen sogenannten Möglichkeitsraum beschreibt, innerhalb dessen eine fahrdynamisch optimierte Trajektorienplanung stattfindet.

Fahrentscheider
bestimmt
Fahrkorridor

Die Datenstruktur besteht im Wesentlichen aus sogenannten Fahrschlauchperlen, die ein fahrbares Gebiet durch eine linke und eine rechte Grenze beschränken, wobei die Fahrschlauchperlen die Stützstellen der Begrenzungslinien darstellen. Die Weite und der Abstand der Perlen werden von der Entscheidungsinstanz an die Umgebungsbedingungen derart angepasst, so dass die Verbindung der Perlen durch einen B-Spline 4. Ordnung den Fahrkorridor aufspannt. Jede Perle beinhaltet

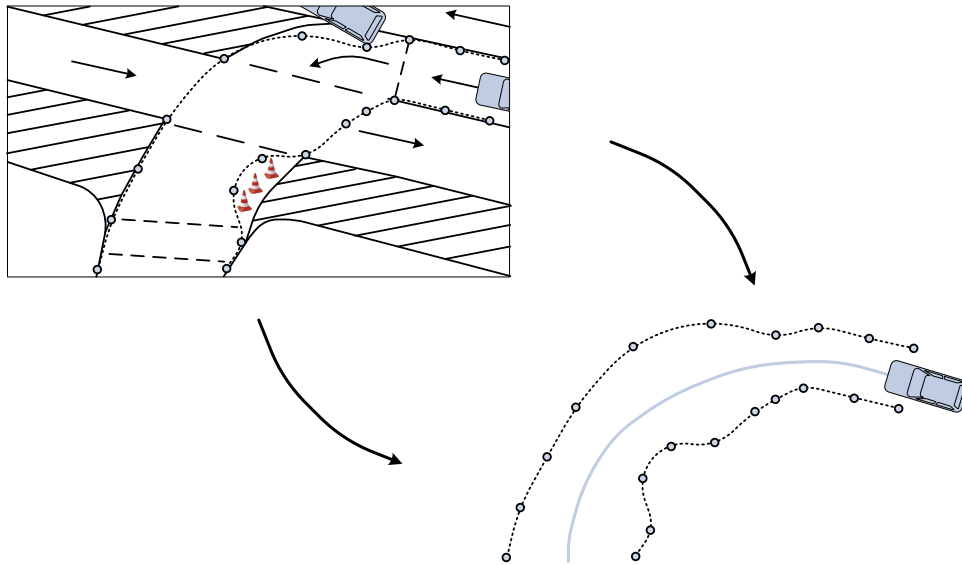


Abbildung 7.9.: Datenstruktur zur Abbildung von Fahrentscheidungen

neben einer örtlichen Position auch eine Geschwindigkeitsvorgabe, die die Sollgeschwindigkeit an der entsprechenden Position beschreibt.

Über die Datenstruktur können beliebig weitere Informationen repräsentiert werden. Über sogenannte Komfortlevel⁷ besteht unter anderem die Möglichkeit, durch einen Parametersatz für die maximalen Längs- und Querbeschleunigungen einen Dynamikbereich vorzugeben, mit dem die Sollbahn befahren wird.

7.2.3. Mehrstufiges System zur Fahrzeugführung

Über die im vorigen Abschnitt dargestellte Schnittstelle werden Fahrentscheidungen an die Umsetzungsmodule übertragen. Abbildung 7.10 beschreibt, wie der gewünschte Fahrkorridor in einem mehrstufigen Prozess ermittelt wird. Dazu stehen grundsätzlich drei verschiedene Arten von Eingangsdaten zur Verfügung: A-Priori-Wissen in Form einer digitalen Karte, ein Belegungsgitter mit statischen Hindernissen sowie Objekt-Daten, die dynamische Informationen über das Umfeld enthalten.

Aus der digitalen Karte und den enthaltenen Fahrbahnbegrenzungen spannt sich ein initialer Möglichkeitsraum auf, in dem eine A-Priori-Trajektorienplanung mit dem Ziel vorgenommen wird, anhand des zur Verfügung stehenden Kartenmaterials eine für die Gesamtstrecke optimierte Trajektorie zu ermitteln. Insbesondere auf kurvenreichen Strecken

A-Priori-Planung

⁷Über ein Komfortlevel kann zwischen einem vorrangig komfortablen oder dynamischen Fahrverhalten umgeschaltet werden.

eröffnet dieser Ansatz neue Möglichkeiten der Optimierung, denn mit der Kenntnis des kompletten Kurvenverlaufs besteht die Möglichkeit, Kurven optimiert anzufahren. Das Resultat ist eine Minimierung der Querbesehleunigung und der Lenkaktivität des Lenkaktuators. Sofern der Kurs vollständig hindernisfrei ist, könnte der Testträger dieser Trajektorie uneingeschränkt folgen.

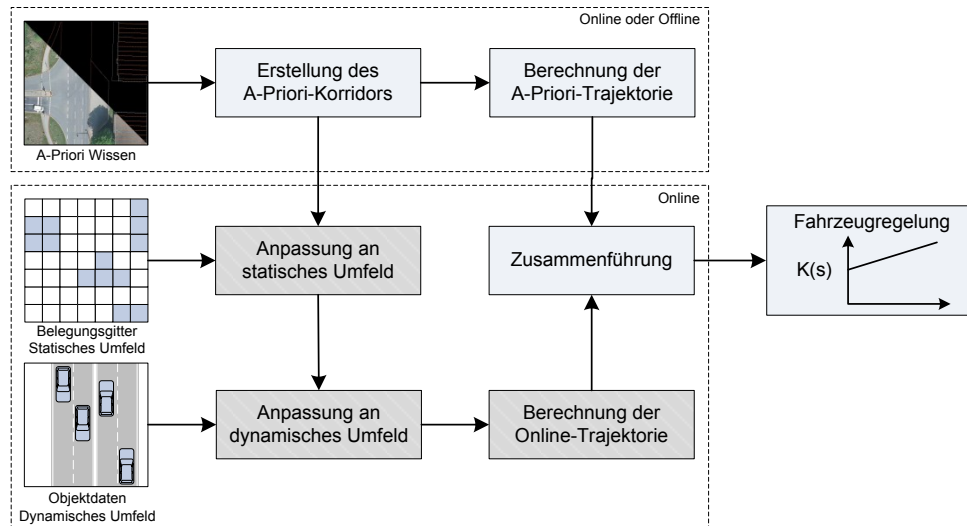


Abbildung 7.10.: Mehrstufiges Konzept zur Fahrzeugführung; die dunkel hinterlegten Berechnungsschritte zur Online-Anpassung des Fahrkorridors und der Trajektorienplanung sind im Versuchsträger Leonie implementiert, wurden zur Darstellung des Auftaktszenarios (vgl. Abschnitt 4.2.2) aber nicht verwendet

Online-Anpassung

Während der Fahrt erfolgt eine Online-Anpassung des geplanten Korridors an die tatsächliche Verkehrssituation in Form von Ausweichbewegungen innerhalb des eigenen Fahrstreifens oder durch Wechsel auf benachbarte Fahrstreifen. Dazu wird im ersten Schritt auf Basis des Belegungsgitters ein an statische Hindernisse angepasster Fahrkorridor berechnet. Parallel dazu bereitet die Situationsanalyse Objektdaten auf, so dass im zweiten Schritt das Entscheidungsmodul auf den Korridor einwirken kann und eine Anpassung an dynamische Hindernisse vornimmt. Abschließend wird der so bestimmte Konfigurationsraum an die Trajektorienplanung übergeben und es erfolgt ein partielles Neuberechnen der A-Priori-Trajektorie und Umsetzung durch die Fahrzeugregelung.

Anhand der Beispiele einer Folgefahrt und eines Fahrstreifenwechsels wird die Funktionsweise der Abbildung von Fahrentscheidungen in ein Fahrverhalten verdeutlicht:

Folgefahrt

Bei einer Folgefahrt verwendet das Fahrzeug ausschließlich die a-priori berechnete Trajektorie, die wie beschrieben vorab für alle Fahrstreifen ermittelt wird. Über die Anpassung der Geschwindigkeit ist es möglich, den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug abzustimmen und auch auf Ein- und Ausscherer zu reagieren sowie die Phasen der Lichtsignalanlagen korrekt zu beachten (Abbildung 7.11a).

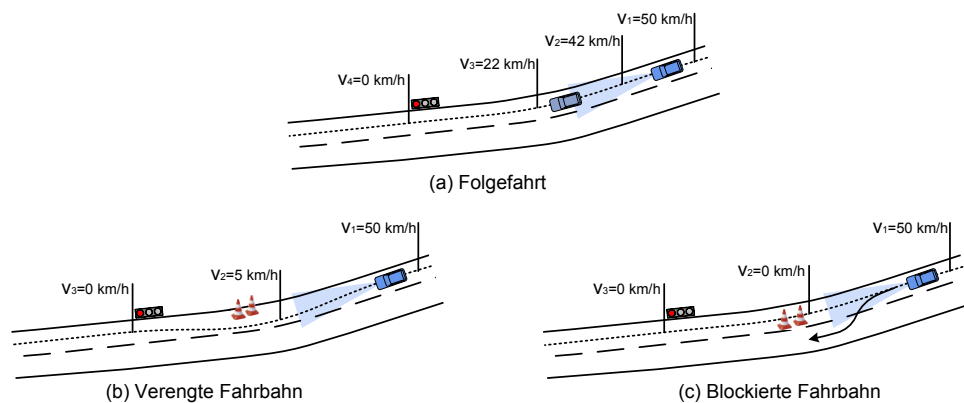


Abbildung 7.11.: Abbildung einer Folgefahrt

Zusätzlich verengen seitlich parkende Fahrzeuge, Gegenstände auf dem Fahrstreifen oder andere statische Hindernisse den fahrbaren Bereich. Zunächst werden daher die seitlichen Grenzen des Fahrkorridors durch ein Verschieben der Fahrschlauchperlen in ihrer Position derart angepasst, dass der Korridor auf den fahrbaren Bereich beschränkt wird und damit ein kollisionsfreies Passieren des Abschnitts möglich ist. Sofern die Breite des Neuberechneten Korridorabschnitts zur Weiterfahrt ausreicht, erfolgt ein partielles Neuplanen der vorab berechneten Trajektorie für diesen Bereich (Abbildung 7.11b).

Kann hingegen der Abschnitt beispielsweise aufgrund einer zu geringen Korridorbreite nicht mehr von dem Testträger passiert werden, ist der Abschnitt als blockiert zu erkennen, so dass ein Fahrstreifenwechsel in den Nachbarfahrstreifen oder ein Halt erfolgt (Abbildung 7.11c).

Fahrstreifenwechsel

Fahrstreifenwechsel sind durch das Überführen von einer vorab berechneten Trajektorie des Startfahrstreifens auf eine Nachbartrajektorie des Zielfahrstreifens möglich. Das Entscheidungsmodul definiert den Startpunkt des Fahrstreifenwechsels innerhalb des A-Priori-Korridors auf dem

Startfahrstreifen, sowie das Ende des Fahrstreifenwechsels im A-Priori-Korridor des Zielfahrstreifens. Die Festlegung von Start- und Zielpunkt ergibt sich aus dem Verkehrsumfeld und den kinematischen Beschränkungen des Testträgers. Das Ergebnis ist ein Gesamtkorridor, der den Fahrstreifenwechsel beinhaltet und das Fahrzeug über beide Fahrstreifen hinweg kollisionsfrei und regelkonform führt (Abbildung 7.12). Über die Anpassung der Geschwindigkeit wiederum ist es möglich, das Einhalten von Abständen zu vorausfahrenden Fahrzeugen zu gewährleisten.

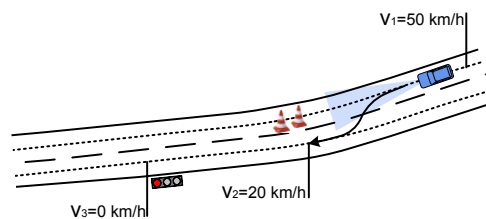


Abbildung 7.12.: Fahrstreifenwechsel

7.2.4. Manöverübergreifende Entscheidungsumsetzung

Sowohl der A-Priori-Berechnung als auch der Online-Anpassung der Trajektorie liegt ein Algorithmus zugrunde, der in Bezug auf Querbeschleunigung und Lenkaktivität optimierte Trajektorien innerhalb eines vorgegebenen Korridors manöverübergreifend berechnet. Erreicht wird diese Optimierung durch Reduzierung der Krümmung und der Krümmungsänderung der Trajektorie. Es erfolgt dabei keine manöverabhängige Berechnung einzelner Trajektorienabschnitte und abschließender Zusammenführung zu einer Gesamttrajektorie. Stattdessen werden komplette Kurvenverläufe gemeinsam behandelt.

Eine manöverübergreifende Trajektorienplanung bietet den grundsätzlichen Vorteil, optimiert und mit möglichst geringem Stellgrößenverlauf zu fahren. Bereits in der Studie „Geschwindigkeiten bei kreisförmiger Kurvenfahrt - Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze“ (Schimmelpfennig u. Hebing, 1982) zeigen die Autoren an einem Rechenbeispiel den Effekt des Kurvenschneidens mit den daraus resultierenden erhöhten Sicherheits- und Stabilitätsgrenzen. Das folgende Beispiel verdeutlicht den positiven Effekt auf das Gesamtfahrverhalten, der aus der übergreifenden Behandlung von Fahrmanövern resultiert.

Die Stabilitätsgrenze eines Fahrzeugs ist in der Studie als maximal mögliche Querbeschleunigung a_{stabil} definiert und ergibt sich aus dem Gleitreibungswert μ und der Erdbeschleunigung g zu $a_{stabil} = \mu \cdot g$.

Ziel sind möglichst geringe Stellgrößen

Unter Annahme der Querneigung Q einer Kurve und dem Radius r der Kurvenfahrt entspricht dies einer Geschwindigkeit von:

$$v_{stabil} = \sqrt{(a_{stabil} + g Q/100) r} \quad (7.1)$$

Um einem plötzlich auftretenden Hindernis gefahrlos ausweichen zu können, überschreitet ein „Normalfahrer“ gewisse Querbeschleunigungen nicht, die als Sicherheitsgrenze bezeichnet werden:

$$a_{sicher} = \begin{cases} 0,103 v & v < 31,5 \text{ km/h} \\ \frac{v^2}{157} e^{-v/41,3^{1,5}} & v > 31,5 \text{ km/h} \end{cases}, [a_{sicher}] = \text{m/s}^2 \quad (7.2)$$

Sicherheitsgrenze
der Querbeschleunigung

Damit lässt sich die zulässige Höchstgeschwindigkeit v über den Kurvenradius r ableiten:

$$v_{sicher} = \begin{cases} 1,34 r & r < 23 \text{ m} \\ 41,3 \sqrt[1,5]{\ln\left(\frac{r}{12,1}\right)} & r > 23 \text{ m} \end{cases}, [v_{sicher}] = \text{km/h} \quad (7.3)$$

Die Querneigung Q einer Kurve wird dabei durch eine Geschwindigkeitserhöhung $\Delta v \approx 0,9 Q$ berücksichtigt. Für eine Kurve mit einer Richtungsänderung von $\alpha = 60^\circ$ und 5 % Überhöhung folgt im dargestellten Beispiel ein Radius $r = 33,8 \text{ m}$. Die Stabilitätsgrenze ergibt sich mit $\mu = 0,71$ entsprechend zu $a_{stabil} = 7 \text{ m/s}^2$ mit der Grenzgeschwindigkeit $v_{stabil} = 57 \text{ km/h}$, die Sicherheitsgrenze zu $v_{sicher} = 46,5 \text{ km/h}$.

Wird die Kurve hingegen angeschnitten, ist es möglich, z.B. einen Radius von $r = 46,1 \text{ m}$ zu erreichen, so dass die Stabilitätsgrenze auf $v_{stabil} = 67 \text{ km/h}$ und die Geschwindigkeit der Sicherheitsgrenze auf $v_{sicher} = 52,6 \text{ km/h}$ erhöht wird.

Kurvenanschnitten erhöht
Stabilitäts- und
Sicherheitsgrenze

Das folgende Kapitel beschreibt den im Projekt Stadtpilot entwickelten manöverübergreifenden Trajektorienplanungs-Algorithmus.

8 Optimiertes Fahrverhalten

Die aus der Umgebung des Braunschweiger Stadtrings abgeleiteten Anforderungen in Kapitel 5 haben die Vorteile einer manöverübergreifenden Fahrzeugführung aufgezeigt. Entscheidungsfindung und Entscheidungsumsetzung sind derart entkoppelt, dass Trajektorien manöverübergreifend und krümmungsoptimiert generiert und optimierte Sollvorgaben für das autonome Straßenfahrzeug Leonie ermöglicht werden. Durch die manöverübergreifende Optimierung ist sowohl eine verbesserte Genauigkeit in der Querführung als auch ein erhöhter Fahrkomfort möglich. Im Rahmen des Stadtpilot-Projekts ist daher ein neuartiges analytisches Optimierungsverfahren entwickelt worden, das manöverübergreifend krümmungs- und krümmungsänderungsoptimierte Trajektorien mit dem Ziel berechnet, eine für die Gesamtstrecke fahrdynamisch optimierte Sollvorgabe in Bezug auf Querbeschleunigung und Lenkaktivität zu ermitteln.

Bekannte
Planungsverfahren
berechnen
Trajektorien
in Manövern

Bisher wurden autonom befahrene Strecken durch manöverweise generierte Trajektorien abgebildet. Die dazu eingesetzten Planungsalgorithmen basierten dabei in der Regel auf Klothoiden (Fraichard u. Scheuer, 2004), Sigmoid-Funktionen (Tölle, 1996) oder Splines (Piazzini u. Guarino Lo Bianco, 2000). Der Bau von Autobahnen wird seit Mitte des 20. Jahrhunderts in Deutschland ausschließlich mit Klothoiden geplant, so dass eine Initialisierung von Stützstellen für eine Trajektorienplanung in der Fahrbahnmitte einer Konstruktion von Trajektorien auf Basis von Klothoiden entspricht. Demgegenüber ist ein Fahrbahnverlauf in städtischen Gebieten über Jahrhunderte historisch gewachsen, so dass neben der eigentlichen Planung und Optimierung einer Kurve auch die Aufgabe der Stützstellenpositionierung zu lösen ist.

Manöverübergrei-
fende Verfahren

Manöverübergreifende Verfahren wurden bereits vereinzelt eingesetzt. In (Mueller-Bessler et al., 2006) ist ein Algorithmus beschrieben, der zwar eine über den Gesamtkurs optimierte Trajektorie berechnet, jedoch aufgrund des Rechenaufwands nicht echtzeitfähig ist. An der Lulea University of Technology in Schweden wurde ein Verfahren für die Optimierung von Trajektorien für bis zu 120t schwere Förderfahrzeuge einer

schwedischen Erzmine entwickelt (Berglund et al., 2001). Ziel war die Verringerung des Verschleißes an den Fahrzeugen und der Fahrbahn bei gleichzeitiger Erhöhung der Geschwindigkeit. Auch dieses Verfahren berechnet die Trajektorien vorab, da der Algorithmus für eine Echtzeitanwendung nicht geeignet war.

In den folgenden Abschnitten wird das im Stadtpilot eingesetzte Trajektorienmodul vorgestellt (Saust, 2008; Wille et al., 2010b,a). Aufbauend auf einem mechanischen Modell, das angelehnt an das Elastische Band (Quinlan, 1994) den Fahrbahnverlauf beschreibt, sowie unterschiedlichen Spline-Algorithmen werden manöverübergreifend krümmungs- und krümmungsänderungsoptimierte Trajektorien innerhalb vorgegebener Fahrkorridor Grenzen berechnet. Insbesondere die Echtzeitfähigkeit hebt das im Folgenden vorgestellte Verfahren von bekannten Ansätzen ab.

8.1. Definition der Anforderungen

Die Anforderungen an die Qualität der geplanten Trajektorien leiten sich neben den kinematischen Grundlagen eines Fahrzeugs (siehe Abschnitt 6.1) aus dem Szenario und der Umgebung des Braunschweiger Stadtrings ab. Während bei bisherigen Ansätzen in der Trajektorienplanung für autonome Straßenfahrzeuge die Optimierung des Fahrkomforts meist untergeordnet war, wird im Projekt Stadtpilot einem ruhigen und komfortablen Fahrverhalten in der Längs- und Querverführung ein hoher Stellenwert zugesprochen.

Komfort bei bisherigen Ansätzen untergeordnet

Stellgrößenoptimierte Trajektorien entlasten den Queraktuator, der aufgrund einer begrenzten Dynamik nicht beliebige Stellvorgänge vornehmen kann. Eine reduzierte Trajektorienkrümmung führt zu geringeren Lenkeinschlägen und damit zu autonomen Fahrten mit verringerter Querverbeschleunigung. Kleinere Krümmungsänderungen reduzieren weiterhin die Lenkaktivität und damit den Querruck. Über die Trajektorienkrümmung und Krümmungsänderung werden daher die Stellreserve des Lenkaktuators und der Abstand zur Haftungsgrenze beeinflusst.

Erhöhung der Stellreserve

Der historisch entstandene Streckenverlauf der Stadtringumgebung erfordert einen Algorithmus zur Positionierung von Stützstellen innerhalb des befahrbaren Raumes. Ein verallgemeinerter Ansatz zur Stützstellenpositionierung erlaubt den Einsatz für beliebige Straßenverläufe.

Im Vergleich zu Autobahnen oder den Verhältnissen in der Urban Challenge zeichnet sich der Braunschweiger Stadtring unter anderem

Herausforderung
der Umgebung

durch schmalere Fahrbahnen und kleinere Kurvenradien nahe dem Wendekreis des Testträgers aus. Unabhängig von diesen unterschiedlichen Rahmenbedingungen ist es die Aufgabe des Trajektorienplaners, optimierte Sollvorgaben für die Fahrzeugregelung zu bestimmen.

Übergeordnete
Ziele: Sicher und
komfortabel fahren

Die Ziele des vorgestellten Ansatzes lassen sich damit wie folgt zusammenfassen:

- Gewährleistung eines ruhigen und komfortablen Fahrverhaltens und damit Steigerung des Fahrkomforts durch Reduzierung der auftretenden Querschleunigung und Reduzierung der Lenkaktivität
- Realisierung einer möglichst hohen Stellreserve des Lenkaktuators
- Vergrößerung des Abstands zur Haftungsgrenze
- Simultane Positionierung der Stützstellen und Planung der Trajektorien innerhalb eines auf Basis des historisch entstandenen Straßenverlaufs berechneten Fahrkorridors
- Unabhängigkeit des Ansatzes von Fahrmanövern und Fahrbahnrahmenbedingungen
- Erweiterung der Planungsmöglichkeiten des Entscheidungsmoduls zur Realisierung von bisher nicht möglichen Fahrmanövern

8.2. Kartenbasierte manöverübergreifende Trajektorienplanung

Grundlage der manöverübergreifenden Trajektorienplanung ist ein vom Entscheidungsmodul bereitgestellter Fahrkorridor, in dem es dem Fahrzeug möglich ist, sich kollisionsfrei und regelkonform zu bewegen. Der Korridor ist durch eine linke und rechte Begrenzung in Form von Fahr-schlauchperlen definiert und stellt den Optimierungsspielraum für das Trajektorienplanungsmodul dar (siehe Abschnitt 7.2.2).

Nutzung von
Kartenmaterial

Wie in Abschnitt 7.2.3 dargestellt, erfolgt für die autonome Fahrt auf dem Gebiet des Stadtrings zunächst eine A-Priori-Planung, die auf Basis von Kartenmaterial krümmungsoptimierte, manöverübergreifende Trajektorien für sämtliche Fahrstreifen der zu fahrenden Gesamtstrecke berechnet. Die Kenntnis des kompletten Kurvenverlaufs ermöglicht es, Kurven optimal anzufahren.

Fahrstreifenwechsel und Ausweichmanöver innerhalb des eigenen Fahrstreifens erfordern ein Abweichen von der a-priori geplanten Trajektorie. Fahrstreifenwechsel werden durch das Überblenden von einer A-Priori-Trajektorie auf eine Nachbartrajektorie realisiert. Ein Ausweichen innerhalb des Fahrstreifens wird durch partielles Anpassen der Trajektorie ermöglicht.

Der A-Priori-Planung und der Onlineanpassung liegt ein gemeinsamer Planungsalgorithmus zugrunde, der folgende unterschiedliche Algorithmen zu einem Gesamtverfahren verbindet:

Kombination
unterschiedlicher
Algorithmen

- ein mechanisches Modell zur Fahrbahnbeschreibung
- ein Verfahren zur Typisierung von Stützstellen
- eine Approximation durch B-Spline-Algorithmen
- ein Glättungsverfahren auf Basis von Smoothing Splines

Das Resultat ist ein echtzeitfähiges¹ Verfahren zur simultanen Initialisierung von Stützstellen und zur Berechnung krümmungsoptimierter Trajektorien innerhalb eines bekannten Fahrkorridors.

Echtzeitfähigkeit

8.2.1. Toleranzband als Optimierungsspielraum

Ein sogenanntes Toleranzband dient der Beeinflussung des Optimierungsspielraums für das Planungsverfahren. Zunächst berechnet sich das Band aus der Differenz von Fahrbahn- und Fahrzeugbreite. Zusätzlich werden Unsicherheiten in der Umfelderkennung und Positionsbestimmung des Testträgers berücksichtigt. Abbildung 8.1 zeigt den Einfluss von zwei stark unterschiedlich gewählten Toleranzbandbreiten und die Auswirkung auf die finale Trajektorie.

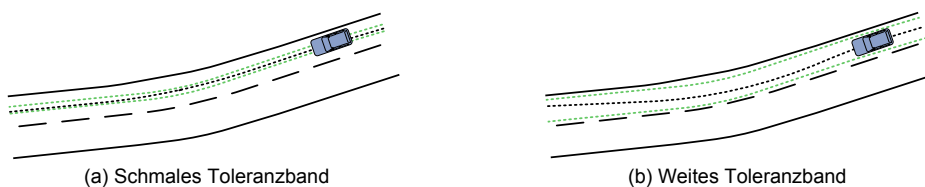


Abbildung 8.1.: Einführung eines Toleranzbandes zur Beeinflussung des Optimierungsgrades

¹Echtzeitfähigkeit bedeutet in diesem Fall, dass der Algorithmus Trajektorien schneller berechnet als das Fahrzeug diese befahren kann.

Ein Vorteil des Toleranzbandes liegt in der Möglichkeit, Präzisionsgewinne in übergeordneten Modulen direkt in ein besseres Fahrverhalten abzubilden. Ist beispielsweise ein Präzisionsgewinn in der Ortungslösung um einige Zentimeter erreicht, wird das Toleranzband entsprechend aufgeweitet und resultiert unmittelbar in einem höheren Optimierungsgrad der Trajektorien.

8.2.2. Planungsalgorithmus

Der A-Priori-Trajektorienplanung und der Online-Anpassung liegt ein echtzeitfähiger Optimierungsalgorithmus unter Anwendung der Ausgleichsbewegung des Elastischen Bandes sowie dem Einsatz von Smoothing Splines zugrunde. Der Algorithmus ermittelt fahrdynamisch optimierte Trajektorien innerhalb des gegebenen Fahrkorridors. Ziel ist es,

Stufe A: Analyse und Typisierung des Kursverlaufs Analytischer Teil zur Typisierung der Stützstellen mit dem Ziel, Verschiebungsvektoren zu bestimmen, die die Stützstellenposition verbessern.	Stufe B: Reduzierung der Krümmungsmaxima Reduzierung der Krümmungsmaxima durch ein mechanisches Modell, das auf der Anwendung des ausgleichenden Kräftegleichgewichts des Elastischen Bandes beruht.	Stufe C: Glättung in der Krümmung-Weg-Ebene Glättung des Krümmungsverlaufs durch Smoothing Splines in der Krümmung-Weg-Ebene und abschließende Berechnung der optimierten Trajektorie.

Abbildung 8.2.: Planungsalgorithmus bestehend aus drei Stufen

den Krümmungsverlauf einer Trajektorie unter Berücksichtigung geometrischer Beschränkungen zu reduzieren. Drei Bausteine führen zu dem Optimierungsergebnis (Abbildung 8.2):

Analyse

A Ein analytischer Teil initialisiert und typisiert Stützstellen in End-, Übergangs- und Glättungspunkte mit dem Ziel der Bestimmung von Verschiebungsvektoren zur Verbesserung der Stützstellenposition.

Optimierung

B Die Anwendung des ausgleichenden Kräftegleichgewichts des Elastischen Bandes führt zu der gewünschten Verschiebung der Stützpunkte, so dass sich die Krümmungsmaxima der Trajektorie reduzieren.

- C Nach einer Glättung des Krümmungsverlaufs durch Smoothing Splines in der Krümmung-Weg-Ebene erfolgt die abschließende Berechnung der optimierten Trajektorie.

Glättung

A: Analyse und Typisierung des Kursverlaufs

Im ersten Schritt des Planungsverfahrens werden die Verschiebungsrichtungen von Stützstellen bestimmt, die diese derart verschieben, dass Kurven optimal angefahren werden können. Das Resultat sind Trajektorien, die sich zu Beginn einer Kurve der Außenseite und am Scheitelpunkt der Innenseite annähern (Abbildung 8.3).

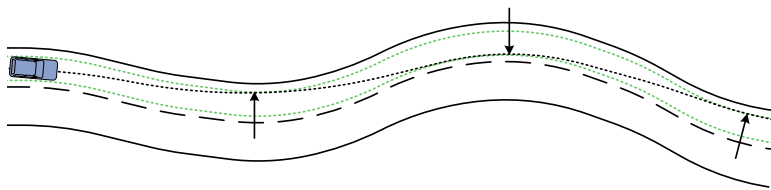


Abbildung 8.3.: Visualisierung der Grundidee: Ziel sind Trajektorien, die zu Beginn einer Kurve an der Außenseite entlang laufen und sich am Scheitelpunkt der Innenseite annähern.

Zunächst wird dazu ein Typisierungsalgorithmus angelehnt an (Naseath, 2007) verwendet, der die notwendigen Verschiebungsvektoren bestimmt, so dass in einem zweiten Schritt die Verschiebung durch die Anwendung eines mechanischen Modells auf Basis des Elastischen Bandes zu der gewünschten Verschiebung führt. Der Verschiebungsvektor berechnet sich in drei Schritten:

1. Zunächst werden Stützstellen mittig zwischen den Grenzen des Fahrkorridors initialisiert und dienen damit als Ausgangsbasis für die weitere Berechnung.
2. Die Stützstellen werden durch den Typisierungsalgorithmus in End-, Glättungs- und Übergangspunkte unterteilt. Endpunkte befinden sich jeweils am Anfang und am Ende einer zu glättenden Kurve. Glättungspunkte sind Stützstellen auf einem gemeinsamen Kurvenbogen, d.h. einer Links- oder Rechtskurve, die gemeinsam optimiert werden. Alle übrigen Stützstellen werden als Übergangspunkte bezeichnet.
3. Auf Basis der Typisierung erfolgt eine typabhängige Berechnung des entsprechenden Verschiebungsvektors.

Initialisierung



Typisierung



Vektorermittlung

End- und Übergangspunkte

Der Typisierungsalgorithmus durchläuft die Stützstellen des zu optimierenden Abschnitts nacheinander und berechnet abhängig von beiden Punkten vor und nach dem zu klassifizierenden Stützpunkt den aktuellen Typ. Der erste und letzte Punkt eines Abschnitts sind grundsätzlich Endpunkte, der zweite und vorletzte Übergangspunkte. Der Typ der übrigen Stützstellen wird durch die benachbarten Stützstellen und deren lotrechten Abstand zu ihrer Verbindungsgeraden bestimmt. Für die Unterscheidung, ob es sich um einen Glättungs- oder Übergangspunkt handelt, werden die Abstände von zwei Punkten zu einer vorgegebenen Geraden bestimmt.

Die Funktion einer Geraden in Hesse-Normalenform lautet in kartesischen Koordinaten im \mathbb{R}^2 allgemein $a x + b y + c = 0$, so dass sich der lotrechte Abstand d_i eines Punktes mit den Koordinaten $(x_i; y_i)$ wie folgt berechnet (Ansorge u. Oberle, 2010):

$$d_i = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} x_i + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} y_i + \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (8.1)$$

Zunächst wird zur Typisierung der Stützstelle i eine Gerade durch die Stützstellen $i - 1$ und i gelegt (Abbildung 8.4, Schritt I). Die Parameter a , b und c berechnen sich dann zu:

$$a = y_{i-1} - y_i \quad (8.2)$$

$$b = x_i - x_{i-1} \quad (8.3)$$

$$c = x_{i-1} y_i - x_i y_{i-1} \quad (8.4)$$

Glättungspunkte

Die Abstände der Stützstellen vor und hinter den Geradenstützstellen d_{i-2} und d_{i+1} werden entsprechend aus Gleichung 8.1 berechnet. Aufgrund der Berechnungsvorschrift steht zusätzlich ein Vorzeichen zur Verfügung, das Auskunft über die Lage der Stützstellen gibt. Sind die Vorzeichen von d_{i-2} und d_{i+1} unterschiedlich, handelt es sich bei der zu typisierenden Stützstelle um einen Übergangspunkt. Gilt hingegen $\text{sgn } d_{i-2} = \text{sgn } d_{i+1}$, ist eine weitere Überprüfung mit einer Geraden durch die Punkte i und $i + 1$ mit

$$a = y_i - y_{i+1} \quad (8.5)$$

$$b = x_{i+1} - x_i \quad (8.6)$$

$$c = x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i \quad (8.7)$$

notwendig (Abbildung 8.4, Schritt II). Wenn $\text{sgn } d_{i-1} \neq \text{sgn } d_{i+2}$ gilt, handelt es sich um einen Übergangspunkt. Bei identischem Vorzeichen liegen die Stützstellen auf derselben Seite der Geraden, so dass es sich um einen primären Glättungspunkt handelt. Die Stützstellen mit den Indizes $i - 1$ und $i + 1$ sind dann sekundäre Glättungspunkte, wobei die vorige Kategorisierung überschrieben wird. Ziel der Typisierung ist es, zusammenhängende Glättungspunkte zu einer Glättungsgruppe zusammenzufassen, die gemeinsam optimiert werden. Der Anfang einer Glättungsgruppe ist eine Stützstelle, die zunächst als Übergangspunkt und im weiteren Typisierungsverlauf als sekundärer Glättungspunkt erkannt wurde. Das Ende einer Gruppe markiert diejenige Stützstelle, die zunächst zum sekundären Glättungspunkt und dann zum Übergangspunkt kategorisiert wurde.

Glättungsgruppen

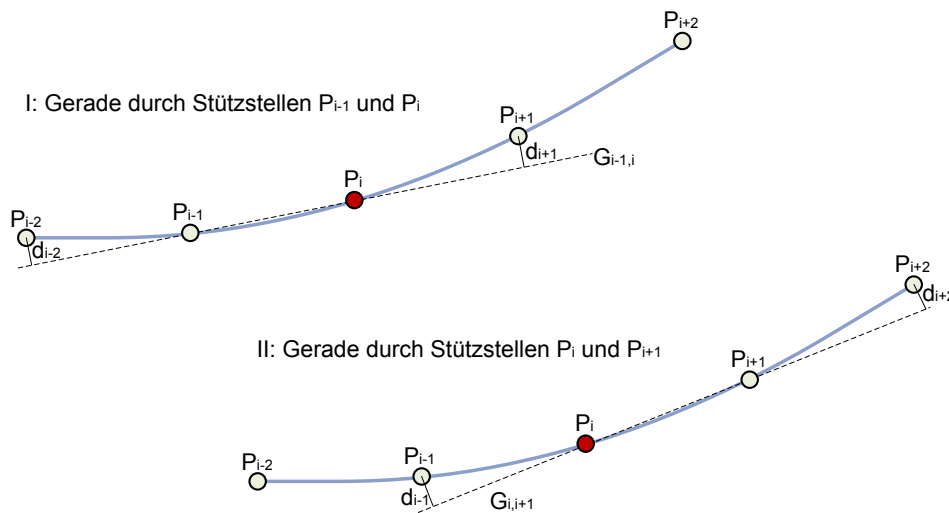


Abbildung 8.4.: Typisierung von Stützstellen

In Abhängigkeit der Stützstellenkategorie ermittelt der zweite Arbeitsschritt die Richtungsvektoren \vec{r}_i der Stützstellen für die Ausgleichsbewegung (Abbildung 8.5).

Richtungsvektoren bilden Ausgleichsbewegung ab

Endpunkte werden auf die Verbindungsgerade der beiden angrenzenden Folgepunkte verrückt:

Bei Endpunkten

$$\vec{r}_i = -\text{sgn } d_i \begin{pmatrix} \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}} \\ \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} \end{pmatrix} \quad (8.8)$$

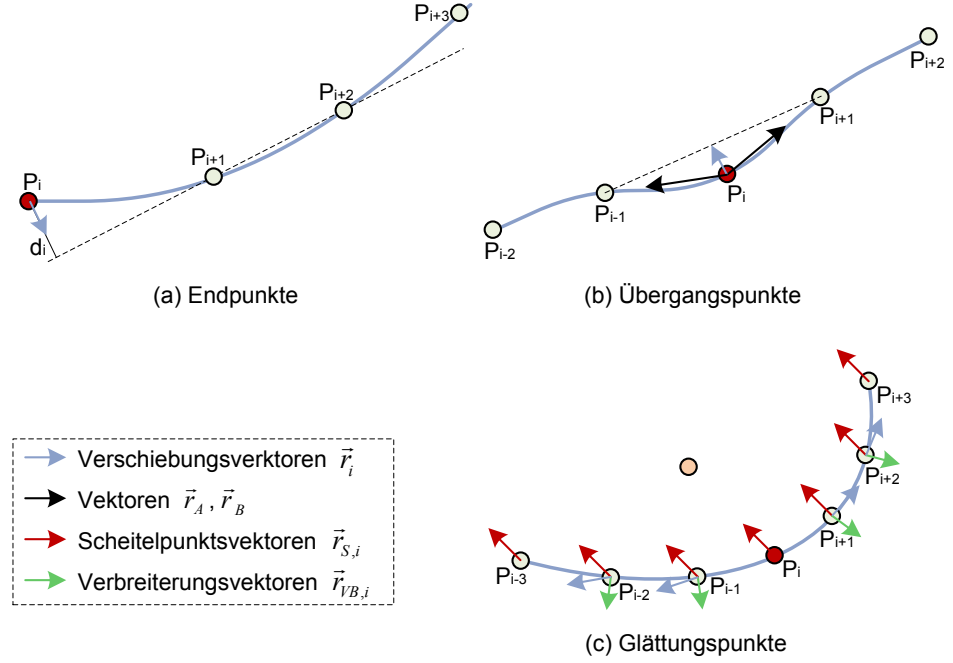


Abbildung 8.5.: Bestimmung der Verschiebungsvektoren (blaue Pfeile) in Abhängigkeit des Stützstellentyps

Dabei gilt:

$$a = y_{i-1} - y_{i-2} \quad (8.9)$$

$$b = x_{i-2} - x_{i-1} \quad (8.10)$$

$$c = x_{i-1} y_{i-2} - x_{i-2} y_{i-1} \quad (8.11)$$

$$d_i = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} x_i + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} y_i + \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (8.12)$$

Bei Über-
gangspunkten

Übergangspunkte werden in Richtung der Verbindungsgeraden benachbarter Punkte verschoben. Der Vektor in Richtung der Winkelhalbierenden bei einem Stützpunkt i berechnet sich mit den Vektoren $\vec{r}_A = (x_{i-1} - x_i; y_{i-1} - y_i)^T$ und $\vec{r}_B = (x_{i+1} - x_i; y_{i+1} - y_i)^T$ zu:

$$\vec{r}_W = \frac{\vec{r}_A}{\|\vec{r}_A\|} + \frac{\vec{r}_B}{\|\vec{r}_B\|} \quad (8.13)$$

Der Richtungsvektor für Übergangspunkte folgt damit zu:

$$\vec{r}_i = \frac{\vec{r}_W}{\|\vec{r}_W\|} \quad (8.14)$$

Für die Glättungspunkte wird ein Verschiebungsvektor bestimmt, der dazu führt, dass sich der Kurvenbogen einerseits aufweitet und sich andererseits der Scheitelpunkt der Glättungsgruppe auf den Krümmungsmittelpunkt zubewegt, so dass Kurven optimiert angefahren werden. Ein Verbreiterungsvektor und ein Scheitelpunktsvektor werden hierfür zueinander gewichtet.

Bei Glättungspunkten

Für die Bestimmung des Scheitelpunktes wird die Stützstelle mit der maximalen Krümmung ermittelt. Der Scheitelpunktsvektor $\vec{r}_{S,i}$ ist dann der Vektor, der vom Scheitelpunkt der Kurve zum Mittelpunkt des Krümmungskreises M mit den Koordinaten $(x_{M,i}; y_{M,i})$ führt, wobei $\vec{r}_M = (x_{M,i} - x_i; y_{M,i} - y_i)^T$ gilt:

$$\vec{r}_{S,i} = \frac{\vec{r}_M}{\|\vec{r}_M\|} \quad (8.15)$$

Der Verbreiterungsvektor berechnet sich analog zum Richtungsvektor bei Übergangspunkten, allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen:

$$\vec{r}_{VB,i} = -\frac{\vec{r}_W}{\|\vec{r}_W\|} \quad (8.16)$$

Der resultierende Richtungsvektor ergibt sich schließlich aus der gewichteten Summe der beiden Vektoren, wobei mit dem Gewichtungsfaktor c die Gewichtung zwischen Aufweitung und Verschiebung zum Krümmungsmittelpunkt festgelegt wird:

$$\vec{r}_i = \frac{\vec{r}_{VB,i} + c \vec{r}_S}{\|\vec{r}_{VB,i} + c \vec{r}_S\|} \quad (8.17)$$

Nachdem im ersten Schritt über die Typisierung der Stützstellen die erforderlichen Korrekturrichtungen bestimmt wurden, ergeben sich daraus im nächsten Schritt die resultierenden Verschiebungen der einzelnen Stützstellen.

B: Reduzierung der Krümmungsmaxima

Die Richtungsvektoren der Stützstellen für die Ausgleichsbewegung aus Schritt A geben vor, in welche Richtung eine Stützstelle zu verschieben ist, damit die Krümmung der Gesamttrajektorie reduziert wird. Mittels eines mechanischen Modells auf Basis des sogenannten Elastischen Bandes wird die gewünschte Ausgleichsbewegung erreicht.

Mechanisches
Modell basiert auf
elastischem Band

Die Bahnplanung mit der Methode des Elastischen Bandes basiert auf der physikalischen Vorstellung eines elastisch verformbaren Materials unter dem Einfluss externer Kräfte. In dem hier vorgestellten Algorithmus wird allerdings ausschließlich die ausgleichende Wirkung des Elastischen Bandes in Form eines Kräftegleichgewichts genutzt, sich in einen spannungsfreien Zustand zusammenzuziehen, so dass ein krümmungsminimierter Sollbahnverlauf entsteht. Durch Auslenkung entsprechend der internen und externen Kräfte stellt sich eine Gleichgewichtslage ein, die die typisierten Punkte entsprechend ihrer Verschiebungsrichtung beeinflusst, so dass ein möglichst glatter Sollbahnverlauf entsteht.

Federmodell

Das Elastische Band besteht aus n masselosen Punkten, die durch sogenannte interne Federn mit ihren jeweiligen Nachbarn gekoppelt sind, so dass auf die Punkte jeweils die Kraft \vec{f}_{int} ausgeübt wird. Durch externe Federn wird jeder Punkt zusätzlich an den linken und rechten Rand über die Kräfte \vec{f}_{ext} gekoppelt. Abbildung 8.6 zeigt den Aufbau des Bandes innerhalb des vorgegebenen Fahrkorridors. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens ist in (Quinlan, 1994) gegeben.

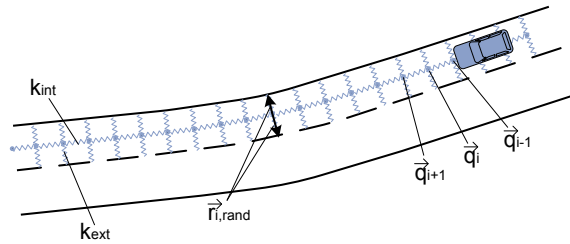


Abbildung 8.6.: Aufbau eines Elastischen Bandes innerhalb des ermittelten Fahrkorridors

Das allgemeine Potenzial V_f einer Feder mit der Steifigkeit k , der Federruhelänge l_0 und dem Verbindungsvektor \vec{r}_f lautet:

$$V_f = \frac{k}{m} (\|\vec{r}_f\| - l_0)^m \quad (8.18)$$

Der Parameter m bestimmt das Verhalten der durch das Potenzial beschriebenen Feder. In (Quinlan, 1994) wird für die internen Federn $m = 1$ gewählt, so dass folgt:

$$V_f = k_{int} (\|\vec{r}_f\| - l_0) \quad (8.19)$$

Die Summe der Potenziale der internen Federkräfte ergibt das gesamte interne Potenzial V_{int} . Mit $\vec{r}_f = \vec{q}_{i+1} - \vec{q}_i$ und einer Federruhelänge $l_0 = 0$ folgt:

Interne Federkräfte

$$V_{int} = k_{int} \sum_{i=1}^{n-1} (\|\vec{q}_{i+1} - \vec{q}_i\|) \quad (8.20)$$

Nach dem Lagrange Formalismus folgt die auf den Punkt q_i wirkende Kraft f_{int} zu:

Lagrange
Formalismus

$$\vec{f}_{int}(i) = -\nabla V_{int} \quad (8.21)$$

$$= -k_{int} \frac{\partial}{\partial \vec{q}_i} (\|\vec{q}_{i+1} - \vec{q}_i\| + \|\vec{q}_i - \vec{q}_{i-1}\|) \quad (8.22)$$

$$= k_{int} \left(\frac{\vec{q}_{i+1} - \vec{q}_i}{\|\vec{q}_{i+1} - \vec{q}_i\|} + \frac{\vec{q}_{i-1} - \vec{q}_i}{\|\vec{q}_{i-1} - \vec{q}_i\|} \right) \quad (8.23)$$

Diese Kraft ist unabhängig von der Federlänge, so dass jeder Punkt seine Nachbarn wie gewünscht mit der einheitlichen Federsteifigkeit k_{int} abstößt.

Für das Potenzial einer externen Federkraft folgt mit $m = 2$:

Externe
Federkräfte

$$V_{ext} = \frac{k_{ext}}{2} (\|\vec{r}_{i,rand}\| - l_0)^2 \quad (8.24)$$

Die auf den Punkt wirkenden Kräfte lauten entsprechend:

$$\vec{f}_{ext1}(i) = k_{ext1} (\|\vec{r}_{i,rand1}\| - l_0) \frac{\vec{r}_{i,rand1}}{\|\vec{r}_{i,rand1}\|} \quad (8.25)$$

$$\vec{f}_{ext2}(i) = k_{ext2} (\|\vec{r}_{i,rand2}\| - l_0) \frac{\vec{r}_{i,rand2}}{\|\vec{r}_{i,rand2}\|} \quad (8.26)$$

Über die Anpassung dieser Randfedern werden die auf das Elastische Band wirkenden Kräfte so beeinflusst, dass die gewünschte Verschiebung der Stützstellen entsprechend der in Schritt A berechneten Richtungsvektoren stattfindet. Gleichzeitig hat die Bewegung des Elastischen Bandes einen ausgleichenden Effekt auf die Gesamttrajektorie. Für die Abbildung der gewünschten Verschiebung werden die Federruhelängen der Randfedern um die projizierte Länge \vec{p}_i der Richtungsvektoren \vec{r}_i auf den Verbindungsvektor der Randfedern $\vec{r}_{i,rand}$ variiert. Dadurch reduzieren

Reduzierung der
KrümmungAusgleichender
Effekt

die externen Federkräfte die Krümmung des Bahnverlaufs, die internen Kräfte glätten den Krümmungsverlauf:

$$\vec{p}_i = \frac{\vec{r}_{i,rand}(\vec{r}_i h(i))}{\vec{r}_{i,rand}^2} \quad (8.27)$$

Über den Skalierungsfaktor h wird die Länge des Richtungsvektors angepasst. Ein Verkürzen des Richtungsvektors an der ersten Stützstelle verhindert beispielsweise, dass diese zu weit verschoben wird.

Resultierende
Kraft am Punkt

Die resultierende Kraft auf jeden einzelnen Punkt ergibt sich schließlich aus der Summe von internen und externen Kräften:

$$\vec{f}_{sum}(i) = \vec{f}_{int}(i) + \vec{f}_{ext1}(i) + \vec{f}_{ext2}(i) \quad (8.28)$$

Explizites Euler-
Verfahren

Durch die internen und externen Kräfte stellt sich bei einer bestimmten Auslenkung des Elastischen Bandes eine Gleichgewichtslage ein, bei der die resultierende Kraft gleich Null ist. Die Berechnung der Gleichgewichtslage beruht auf dem expliziten Euler-Verfahren zur numerischen Integration. In jedem Zeitschritt wird jeder Punkt entsprechend der Kraft \vec{f}_{sum} um die Länge $w \vec{f}_{sum}$ verschoben, wobei w als Bewegungsfaktor bezeichnet wird und die Länge des Schrittes beeinflusst. Die aktualisierte Position jedes Punktes folgt damit zu:

$$q_i^* = q_i + w \vec{f}_{sum}(i) \quad (8.29)$$

Schrittweiten-
steuerung

Eine Schrittweitensteuerung verhindert eine mögliche Instabilität durch eine zu groß gewählte Schrittweite. Vergrößert sich die Summe der resultierenden Kräfte von einem Zeitschritt auf den anderen, wird die Schrittweite für den nächsten Zeitschritt entsprechend verringert.

C: Glättung in der k-s-Ebene

Zwischenergebnis:
Trajektorie
optimiert, aber
nicht glatt

Bisher konnten die Maxima der Krümmung reduziert werden. Allerdings sind die fahrdynamischen Randbedingungen eines glatten Verlaufs von Krümmung und Krümmungsänderung damit noch nicht erfüllt. Eine Kurve K im \mathbb{R}^2 mit der Parameterdarstellung $f : t \mapsto (f_1(t), f_2(t))$ gilt im mathematischen Sinne als glatt, wenn $f_1(t)$ und $f_2(t)$ auf dem Intervall $[a, b]$ stetig differenzierbar sind und die Ableitungen $\dot{f}_1(t)$ und $\dot{f}_2(t)$ für alle $t \in [a, b]$ existieren.

Statt weiterhin die Position der Stützstellen so zu optimieren, bis ein glatter Krümmungsverlauf erreicht ist, wird in dem hier vorgestellten Verfahren direkt der Krümmungsverlauf verbessert. Zunächst approximiert ein B-Spline vierter Ordnung die aus dem vorigen Arbeitsschritt optimierte Lage der Stützstellen. Anschließend wird die Kurve von der x - y -Ebene in die κ - s -Ebene transformiert, wobei κ die Krümmung und s die Bogenlänge darstellt.

Der in Abschnitt 6.3.2 beschriebene Smoothing Spline nach Schoenberg und Reinsch (de Boor, 2001) eignet sich zur Glättung von Daten, die nicht die genannten Anforderungen erfüllen und dient zu diesem Optimierungszeitpunkt als Instrument zur Krümmungsglättung. Die besonderen Eigenschaften dieses Splines ermöglichen es, den in Schritt B bestimmten Krümmungsverlauf zu glätten, wobei die Trajektorie nahezu unverändert bleibt.

Smoothing Spline

Das Resultat der Anwendung des Smoothing Splines ist ein glatter minimierter Krümmungsverlauf, aus dem sich durch Rücktransformation in die x - y -Ebene die manöverübergreifende, krümmungsoptimierte Trajektorie berechnen lässt. Ist es der Optimierung nicht möglich, eine Trajektorie innerhalb der Optimierungsgrenzen zu bestimmen, wird auf einen früheren Iterationsschritt innerhalb des Verfahrens zurückgegriffen. Im ungünstigsten Fall führt dies bei einem zu schmalen Toleranzband auf die nicht-optimierte Ausgangslage der Solltrajektorie zurück. Allerdings wurde diese zusätzliche Absicherung des Planungsverfahrens bei allen bisherigen Tests und Fahrversuchen nicht benötigt.

Parametrisierung des Algorithmus

Der Algorithmus beinhaltet insgesamt drei Parameter, die das Verhalten der Trajektorienplanung beeinflussen. Im Rahmen der Fahrversuche und Simulationen haben sich die in Tabelle 8.1 aufgeführten Werte als eine sehr gute Kombination erwiesen.

Anwendung des Optimierungsverfahrens

Es ist möglich, das dargestellte Optimierungsverfahren auf beliebige Korridore und Kombinationen von Fahrmanövern anzuwenden. Im Folgenden wird ein typischer Korridorverlauf einer Szene des Braunschweiger Stadtrings bestehend aus mehreren Fahrmanövern gewählt, um die Wirksamkeit des Verfahrens zu verdeutlichen. Bei dem in Abbildung 8.7

Tabelle 8.1.: Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Parametrisierung der manöverübergreifenden Trajektorienplanung

Parameter	Symbol	Wert
Gewichtungsfaktor zur Beeinflussung der Kurvenbogenaufweitung	c	1,3
Bewegungsfaktor	w	0,04
Smoothing Spline Parameter	p	0,04
Federsteifigkeit der internen Federn	k_{int}	1 N/m
Federsteifigkeit der externen Federn	k_{ext}	15 N/m

dargestellten Korridorverlauf vollzieht das Fahrzeug nach einer Folgefahrt einen Fahrstreifenwechsel in Fahrtrichtung nach links, um danach unmittelbar ein Abbiegemanöver nach links vorzunehmen. Die äußere Begrenzung gibt dabei den Bereich an, in dem sich die Kontur des Fahrzeugs aufhalten darf. Der innere Bereich ist hingegen der für das Planungsverfahren zugelassene Optimierungsspielraum. Abbildung 8.8

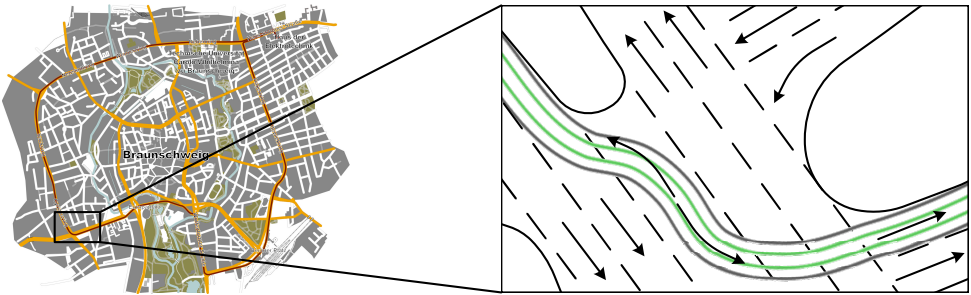


Abbildung 8.7.: Typisches Fahrvorhaben auf dem Braunschweiger Stadtring bestehend aus Folgefahrt, Fahrstreifenwechsel und Abbiegevorgang, Kartendaten CCBYSA 2012 OpenStreetMap.org contributors

stellt die Ausgangslage vor der Optimierung da. Der rot dargestellte Krümmungsverlauf ist eine Trajektorie, die durch einen bereits glättenden B-Spline erzeugt wird, der die Mittelpunkte des fahrbaren Bereichs approximiert. Der zusätzlich dargestellte Krümmungsverlauf verdeutlicht, dass die gewünschten Anforderungen an die Glattheit der Trajektorie nicht erreicht sind. Die Maximalwerte der Krümmung sind zudem derart hoch, dass der dazugehörige Kurvenverlauf nicht fahrbar wäre, da dieser Radien unterhalb des minimal möglichen Wendekreises des Testträgers von 11,4m aufweist.

Aufbauend auf der dargestellten Ausgangslage erfolgt die Anwendung des Trajektorienplanungsverfahrens. Dazu werden zunächst Stützstellen mittig im Toleranzband initialisiert. Es folgt, wie in Abschnitt 8.2.2 be-

Fahrmanöver ohne
Optimierung
nicht abbildbar

Typisierung

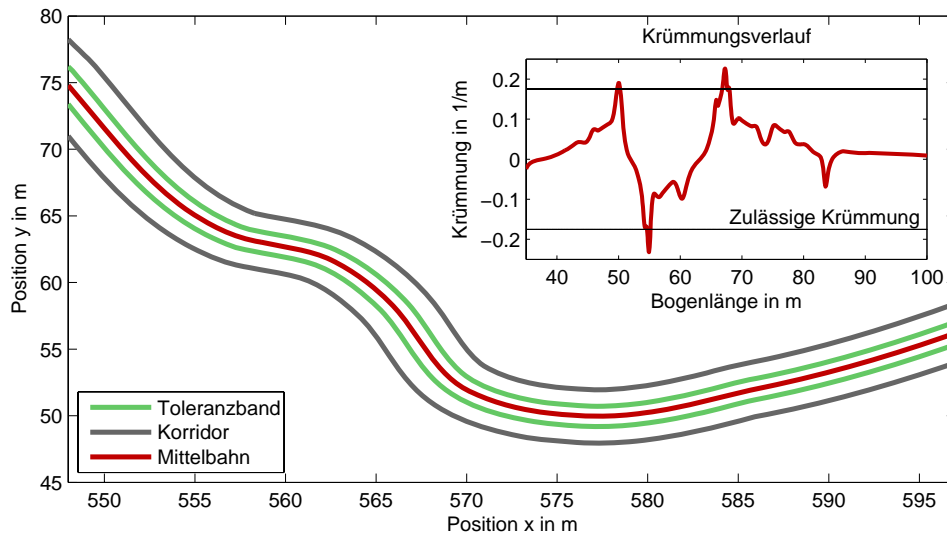


Abbildung 8.8.: Darstellung des für die Optimierung zur Verfügung stehenden Korridors

schrieben wurde, die Typisierung der Stützstellen sowie die Bestimmung von Korrekturrichtungen, in die die Stützpunkte zu verschieben sind. Das vorgestellte mechanische Modell auf Basis eines Elastischen Bandes führt schließlich zu der gewünschten Ausgleichsbewegung. In einem iterativen Prozess werden die Stützstellen in jedem Schritt neu typisiert, Korrekturrichtungen bestimmt und schließlich die Gleichgewichtslage des Elastischen Bandes berechnet. Abbildung 8.9 stellt das Resultat dar. Die blaue Kurve beschreibt eine Trajektorie, die sich aus einem B-Spline vierter Ordnung durch die optimierten Positionen der Stützstellen ergibt. Der eigentliche Trajektorienverlauf ist bereits derart positioniert, dass der dazugehörige Krümmungsverlauf deutlich reduzierte Maxima der Krümmung zeigt. Zum Zeitpunkt dieser Zwischenoptimierung ist der Krümmungsverlauf allerdings noch immer nicht glatt, sondern weist lediglich eine deutlich kleinere Fläche unter dem Graphen der Funktion auf. Für die Berechnung des Optimierungsergebnisses sind in diesem Fall insgesamt 25 Iterationen notwendig. Während Anhang B.1 die Zwischenergebnisse beim Verschieben der Stützstellen zeigt, gibt Anhang B.2 einen Überblick über die dazugehörigen Krümmungsverläufe. Schrittweise wird dabei die Position der Punkte derart verschoben, so dass sich die Fläche unter dem Graphen der Krümmung reduziert.

Da bisher zwar die Krümmung deutlich reduziert werden konnte, aber weiterhin kein glatter Verlauf vorliegt, erfolgt im nächsten Schritt des Verfahrens die in Abschnitt 8.2.2 dargestellte Übertragung in die κ -s-

Ausgleichs-
bewegung

Trajektorie noch
nicht glatt

25 Iterationen
notwendig

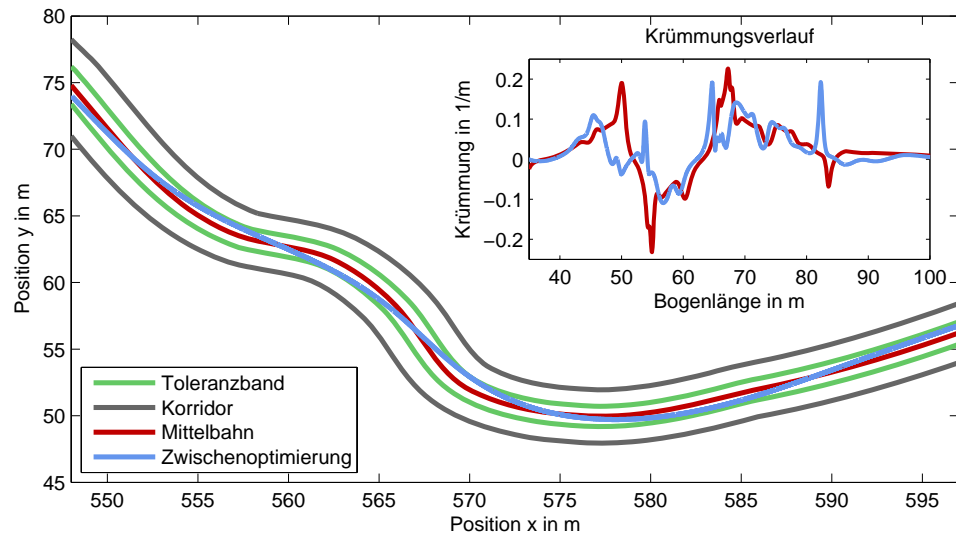


Abbildung 8.9.: Optimierungszwischenergebnis nach Anwendung des Typisierungsverfahrens und Erreichens der Gleichgewichtslage durch das Elastische Band

Anwendung des
Smoothing Splines

Ebene. Die Anwendung des Smoothing Splines führt schließlich zu einem glatten Krümmungsverlauf, der durch einen Stellaktuator darstellbar ist (Abbildung 8.10). Die Rücktransformation in die x - y -Ebene führt zu der endgültigen Trajektorie, die nahezu deckungsgleich mit der Optimierung durch die Typisierung ist. Während also zunächst im ersten Schritt die Position der Trajektorie optimiert wurde, konnte durch den Smoothing Spline ein glatter Krümmungsverlauf erreicht werden.

Downhill-Simplex-
Verfahren
als Referenz

Um die Qualität der berechneten Trajektorie zu evaluieren, wurde zusätzlich ein nicht-echtzeitfähiges numerisches Verfahren angewendet, das auf dem Downhill-Simplex-Verfahren nach Nelder und Mead beruht (Alt, 2002; Lagarias et al., 1998). Dazu wurde das Funktional der Krümmungsänderung minimiert, um einen möglichst glatten Krümmungsverlauf zu erreichen. Das Verfahren dient lediglich als Referenz, denn es eignet sich nicht für einen Einsatz im Fahrzeug. Einerseits ist das Verfahren im Gegensatz zum vorgestellten Algorithmus nicht-echtzeitfähig. Weiterhin ist die Güte der erreichten Trajektorie stark vom Zeitpunkt des Abbruchs abhängig. Eine Herleitung und eine genaue Beschreibung des Algorithmus sind in Anhang C gegeben.

Abbildung 8.11 zeigt den Vergleich des in dieser Arbeit dargestellten iterativen Optimierungsverfahrens mit dem numerischen Ansatz nach Nelder und Mead. Während die Krümmungsverläufe einen sehr ähnlichen Graphen aufweisen, sind die Trajektorien in bestimmten Bereichen sehr

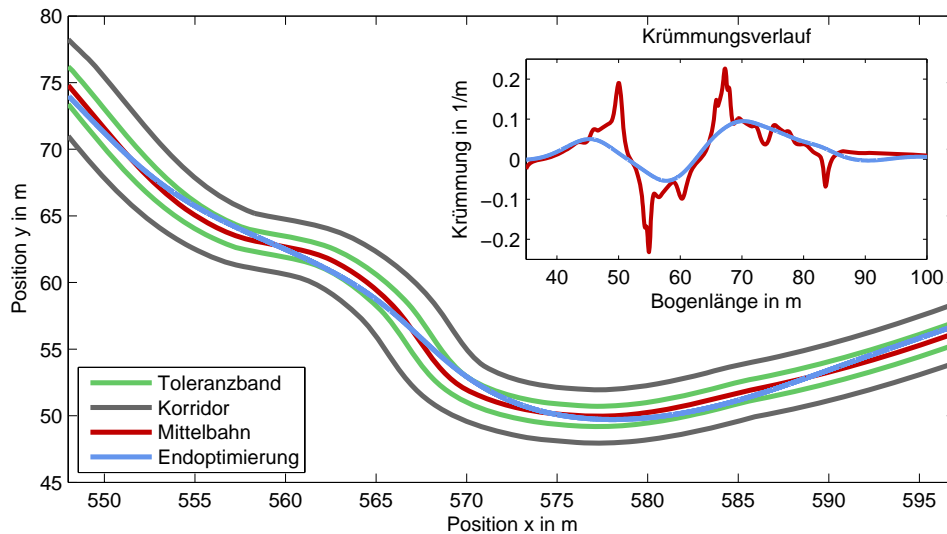


Abbildung 8.10.: Optimierungsergebnis nach Anwendung des Smoothing Splines in der κ -s-Ebene

unterschiedlich. Das in dieser Arbeit vorgestellte Optimierungsverfahren führt zu einer im Vergleich ruhigeren Trajektorie mit einem deutlich glatteren Krümmungsverlauf.

Anwendung in Fahrerassistenzsystemen

In Abschnitt 5.4 wurde ein Fahrerassistenzsystem zur automatischen Gefahrenbremsung vorgestellt, dass bei einer Kollisionsgefahr in die Längsführung des Fahrzeugs eingreift. Ein Eingriff erfolgt nur dann, wenn es dem Assistenzsystem nicht möglich ist, eine Ausweichtrajektorie zu berechnen, d.h., wenn ein Ausweichen durch den Fahrer physikalisch unmöglich ist.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus ist nicht nur für ein manöverübergreifendes autonomes Fahren geeignet, sondern es besteht die Möglichkeit, das Verfahren beispielsweise auch in dem hier beschriebenen Fahrerassistenzsystem einzusetzen. Eine Ausweichtrajektorie wird damit auf Basis des durch die maschinelle Wahrnehmung bestimmten Korridors einfach, robust, schnell und optimiert berechnet. Abbildung 8.12 zeigt die Anwendung des Verfahrens in einem nachgestellten Stauende mit Ausweichmöglichkeit (vgl. Abbildung 5.9).

In weiter fortgeschrittenen Systemausprägungen wäre eine aktive Unterstützung des Fahrers beim Ausweichen durch eine Lenkunterstützung oder vollständige Übernahme der Lenkfunktion denkbar, die auf der

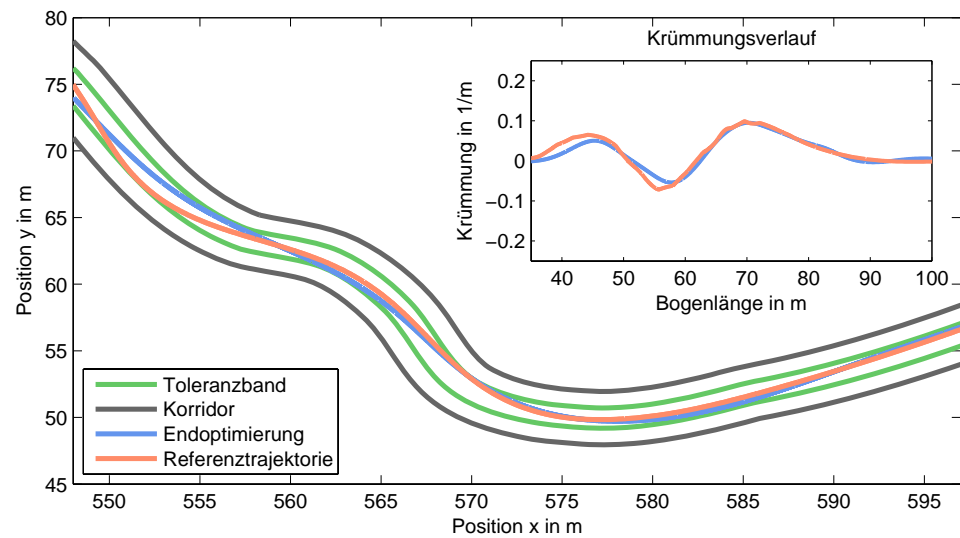


Abbildung 8.11.: Vergleich mit einer Referenztrajektorie, berechnet mit dem Downhill-Simplex-Verfahren nach Nelder und Mead; das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren ist der Referenztrajektorie sowohl im Vergleich der geplanten Trajektorien als auch im Krümmungsverlauf überlegen

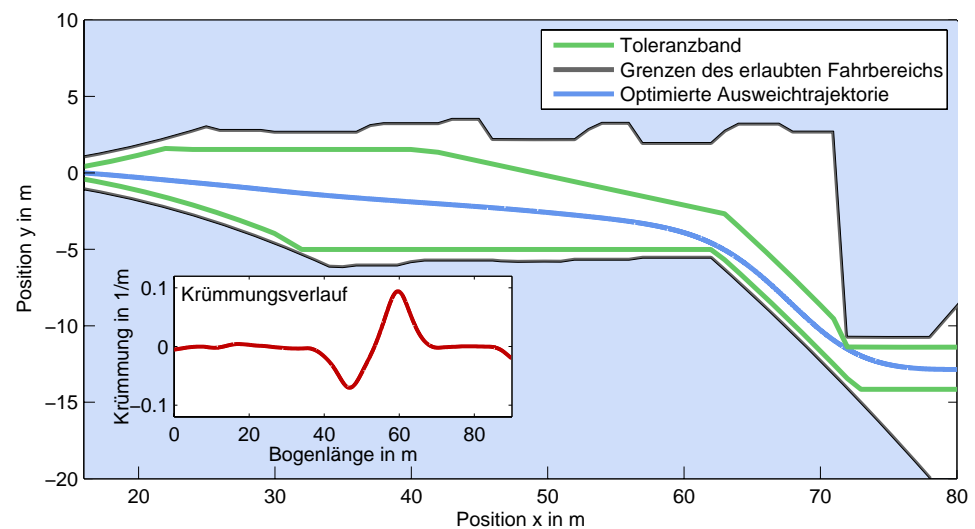


Abbildung 8.12.: Mögliche Anwendung der manöverübergreifenden Trajektorienoptimierung in einem Fahrerassistenzsystem zur automatischen Gefahrenbremsung bei einem nachgestellten Stauende mit Ausweichmöglichkeit. Der Korridor ist aus der Abbildung 5.9 abgeleitet und beruht auf persönlichem Austausch mit M. Reichel, Technische Universität Braunschweig.

durch den Algorithmus berechneten optimierten Trajektorie beruht (Reichel et al., 2010).

8.2.3. Geschwindigkeitsplanung

Nach der im vorigen Abschnitt beschriebenen Wegoptimierung folgt direkt eine Geschwindigkeitsoptimierung. Die Geschwindigkeitsvorgaben des Fahrentscheiders werden damit in ein finales Geschwindigkeitsprofil überführt, welches ein ruckfreies Längsverhalten ermöglicht. Wie in Abschnitt 6.2.1 dargestellt, ist in Assistenzsystemen zur Längsführung ein ruckfreies Fahren anzustreben. Die Geschwindigkeitsplanung wird

Ruckfreie
Längsführung

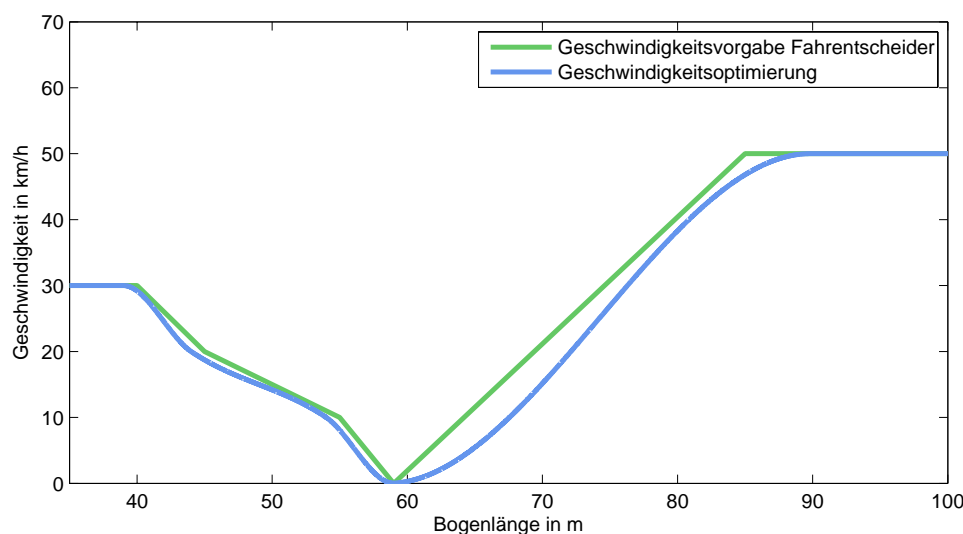


Abbildung 8.13.: Ergebnis der Geschwindigkeitsplanung auf Basis der Vorgaben des Fahrentscheidermoduls

damit als Führungsgrößengenerator für die Längsregelung verstanden, die eine Sollgeschwindigkeit über dem zu fahrenden Weg s ermittelt.

Zur Übertragung der Eingangsdaten des Moduls dient ebenfalls die in Abschnitt 7.2.2 dargestellte Schnittstelle. Polynome dritter Ordnung ergeben stückweise das Gesamtprofil, wobei drei verschiedene Segmente für Beschleunigung, Verzögerung und Zwischenübergänge unterschieden werden. Es entsteht ein auch an den Segmentübergängen zweimal stetig differenzierbarer Geschwindigkeitsverlauf. Je nach Vorgabe durch den Fahrentscheider ist es möglich, ganze Geschwindigkeitsprofile oder nur einzelne Segmente zu berechnen. Abbildung 8.13 zeigt die Anwendung der Geschwindigkeitsplanung auf das zugehörige Geschwindigkeitsprofil der in Abbildung 8.7 dargestellten Sequenz von Fahrmanövern. Während die

Folgefahrt noch mit der erlaubten Höchstgeschwindigkeit absolviert wird, reduziert das Fahrentscheidermodul situationsabhängig die Geschwindigkeit bis hin zum Stillstand auf dem Abbiegestreifen. Abschließend erfolgt die Beschleunigung in das Abbiegemanöver. Eine detaillierte Beschreibung des angewendeten Verfahrens ist in (Perzborn, 2008) beschrieben.

Das dargestellte Verfahren realisiert aus den Vorgaben des Fahrentscheiders sowohl quer- als auch längsgeführt ein optimiertes Fahren.

8.3. Längs- und Querregelung

Die hinsichtlich Sicherheit und Komfort optimierte Trajektorie stellt die Sollvorgabe für die autonome Fahrt dar. Die Längs- und Querregelung ist dafür zuständig, ein präzises Fahren entlang der geplanten Trajektorie zu gewährleisten.

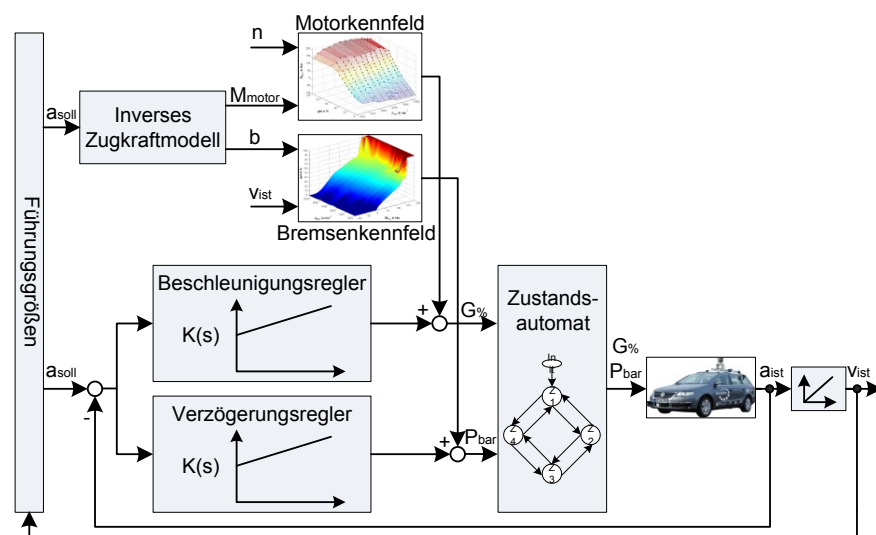


Abbildung 8.14.: Aufbau der Längsregelung

Separate Regelkreise für Beschleunigung und Verzögerung

Vorsteuerung

Grundsätzlich besteht die Längsregelung aus einer Führungsgrößenvorsteuerung und zwei getrennten Regelkreisen $K(s)$, mit denen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge separat behandelt werden. Die Vorsteuerung besteht einerseits aus einem inversen Zugkraftmodell, das aus gegebenen Führungsgrößen das erforderliche Motormoment M_{Motor} und eine notwendige Verzögerung b ableitet. Darüber hinaus werden Kennfelder verwendet, die aus der Motordrehzahl n , dem Motormoment M_{Motor} , der notwendigen Verzögerung b sowie der aktuellen Geschwindigkeit v_{ist} den Vorsteueranteil an der Gaspedalstellung $G\%$ und dem Bremsdruck P_{bar} ermitteln. Ein vordefinierter Zustandsautomat stellt

die Übergänge zwischen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen sicher und verhindert die gleichzeitige Betätigung der Regelkreise für Beschleunigung und Verzögerung. Abbildung 8.14 zeigt den schematischen Aufbau der Längsregelung.

Die Querregelung basiert auf dem in Abschnitt 6.1 dargestellten Einspurmodell. Die drei modellierten Freiheitsgrade eines Kraftfahrzeugs (Position x , Position y und Gierwinkel ψ) werden gemeinsam durch den kommandierten Lenkwinkel δ behandelt. Kursabweichung d und Kurswinkelabweichung $\psi_{ist} - \psi_{soll}$ dienen der Rückführung des Systems. Die

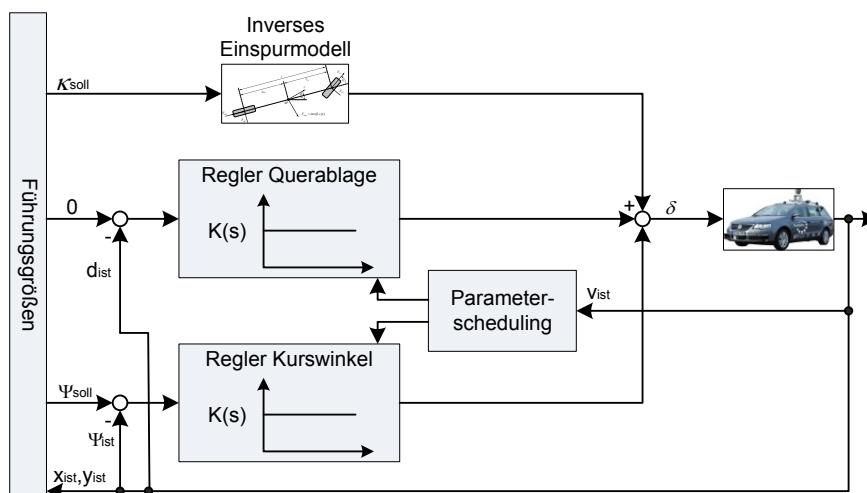


Abbildung 8.15.: Aufbau der Querregelung

Querregelung besteht aus je einem Regler für die Kurs- und Kurswinkelabweichung K_d und K_ψ sowie einer Vorsteuerung auf Basis eines inversen Einspurmodells. Die Vorsteuerung bestimmt den unter der Annahme einer idealen Modellierung des Fahrverhaltens durch das Einspurmodell notwendigen Lenkwinkel, um einer beliebigen Trajektorie mit der Krümmung κ ohne Abweichung zu folgen. Die Regelkreise übernehmen die Aufgabe, nicht-modellierte Einflüsse und Störgrößen durch Aufbringung einer zusätzlichen Regelgröße entgegenzuwirken. Sowohl K_d als auch K_ψ bestehen aus einer geschwindigkeitsabhängigen Verstärkung. Der schematische Aufbau der Querregelung ist in Abbildung 8.15 dargestellt.

Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Längs- und Querregelung ist in (Saust, 2007; Perzborn, 2008; Wille u. Form, 2008a,b; Kolossa, 2010) dargestellt.

Zwei Regelkreise
und Vorsteuerung
als Querregelung

9 Fahrversuche und Evaluation

Simulierte und
reale Fahrversuche

Die Auswertung des im Rahmen dieser Dissertation vorgestellten Verfahrens zur manöverübergreifenden Realisierung von Fahrentscheidungen erfolgt sowohl in einer Simulationsumgebung als auch in realen Fahrversuchen mit dem Versuchsträger Leonie auf einem Testgelände. Durch einen Abgleich mit Verfahren zur manöverbasierten Fahrzeugführung wird das Potenzial des entwickelten Ansatzes aufgezeigt. Als Grundlage der folgenden Darstellung dient eine Studie zur Evaluierung der manöverübergreifenden Trajektorienplanung durch Gütemaße der Fahrzeugquerführung am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig (Cernat, 2010).

Reale Fahrversuche finden auf dem Testgelände statt

Während die simulierten Fahrversuche auf einem Kurs basieren, der auf realen Streckendaten des Braunschweiger Stadtrings aufbaut, wird auf dem Testgelände ein an das zur Verfügung stehende Straßennetz angepasster Parcours verwendet. Die realen Fahrversuche werden bewusst nicht auf dem Braunschweiger Stadtring vorgenommen, da das Abfahren der nichtoptimierten Trajektorien aufgrund einer teilweise mangelnden Güte bereits zum Eingreifen von Sicherheitsmaßnahmen innerhalb von Leonies Fahrzeugführungssystem führen würde. Eine zu hohe resultierende Querablage führt u.a. zum Abbruch des autonomen Fahrmodus, um eine Gefährdung des umgebenden Verkehrs auszuschließen, so dass die Vergleichstrajektorien auf dem Stadtring nicht vollständig autonom befahrbar wären. Die Simulation bietet zum einen den Vorteil der absoluten Reproduzierbarkeit und eröffnet zudem die Möglichkeit, dass sämtliche Größen visualisiert und analysiert werden können, auch solche, die nicht oder nur schwer messbar sind.

9.1. Simulierte Fahrversuche

Die simulierten Fahrversuche finden in einer in MATLAB Simulink erstellten Simulationsumgebung statt. Die vorberechneten Trajektorien werden dabei durch ein virtuelles Fahrzeug befahren, das auf einem Zweispurmodell zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens eines Kraft-

fahrzeugs nach (von Vietinghoff, 2008) beruht (siehe dazu Abschnitt 6.1). Die Parameter des Fahrdynamikmodells entsprechen einem Fahrzeug der Mittelklasse.

Während der Simulation werden unterschiedlichste Messgrößen aufgezeichnet, die eine Auswertung des Fahrversuchs durch Gütemaße ermöglichen. Es werden, wie in Abschnitt 6.2 dargestellt, sowohl direkte Messgrößen als auch abgeleitete Beurteilungsmaße als Gütemaße verwendet.

9.1.1. Virtueller Testkurs

Um das Szenario möglichst realitätsnah abzubilden, werden Kursdaten des nordöstlichen Teils des Braunschweiger Stadtrings verwendet, die auf hochauflösenden Luftaufnahmen der Stadt Braunschweig basieren. Der Testkurs umfasst auf einer ungefähr 750 m langen Strecke insgesamt drei Fahrstreifenwechsel, ein Wendemanöver, ein Abbiegemanöver sowie mehrere Passagen, in denen das Einhalten des Fahrstreifens gefordert ist (Abbildung 9.1). Das Planungsverfahren zur manöverübergreifenden

Testkurs von
750 m Länge

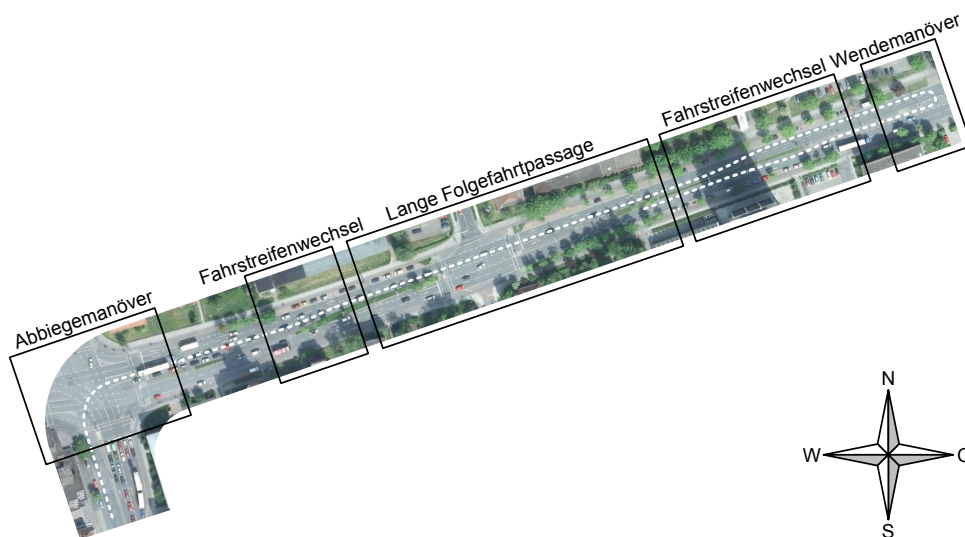


Abbildung 9.1.: Virtueller Testkurs für die simulierten Fahrversuche. Luftbild: ©Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation (NR. 011/2010)

Trajektorienplanung sowie die Vergleichsverfahren auf Basis von Sigmoiden und Splines werden auf diesen virtuellen Testkurs angewendet und durch ein virtuelles Fahrzeugmodell befahren. Für die Längsregelung wird eine Höchstgeschwindigkeit von ungefähr $16 \frac{m}{s}$ angenommen, die

das Fahrzeugmodell im Allgemeinen auch realisiert, das Wendemanöver wird mit ungefähr $4 \frac{m}{s}$ befahren.

Abbildung 9.2 zeigt das Resultat der Anwendung des Verfahrens zur manöverübergreifenden Trajektorienplanung auf dem Testparcours. Der Algorithmus führt zu einer Trajektorie, die innerhalb des Fahrkorridors eine minimierte Krümmung aufweist. In der Abbildung ist das Planungsergebnis in Form der Krümmung κ in Abhängigkeit der Bogenlänge s dargestellt.

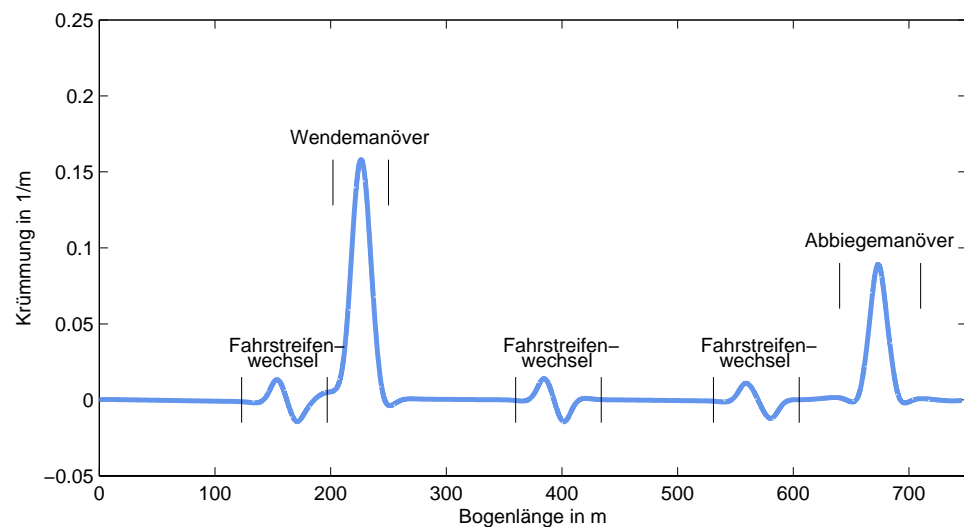


Abbildung 9.2.: Krümmungsverlauf der manöverübergreifenden Trajektorie für den Simulationskurs

Eine Besonderheit dieses Verfahrens liegt in dem Ansatz, die Positionierung von Stützstellen und die Berechnung einer optimierten Trajektorie über große Abschnitte hinweg in einem Algorithmus abzubilden (siehe Abschnitt 8). Bisherige Ansätze der autonomen Fahrzeugführung behandeln Manöver hingegen separat, indem Trajektorien für einzelne Fahrmanöver berechnet und abschließend zu einer Gesamtrajektorie zusammengesetzt werden. Zusätzlich zu der Trajektorie der manöverübergreifenden Planung werden daher zwei alternative Trajektorien bestimmt, die auf Sigmoiden und Splinerverfahren basieren (siehe Abschnitt 6.4) und aus der Aneinanderreihung verschiedener Fahrmanöver hervorgehen. Die Unterschiede zu bekannten Verfahren der Trajektorienplanung sind dabei untergeordnet. Stattdessen wird durch den Vergleich das Potenzial einer manöverübergreifenden Entscheidungsumsetzung sichtbar, die größere Kursabschnitte als Planungsgrundlage verwendet. Die Abbildungen 9.3 und 9.4 zeigen den Krümmungsverlauf der Trajektorien für den

Vergleich mit
manöverselektiven
Planungsverfahren

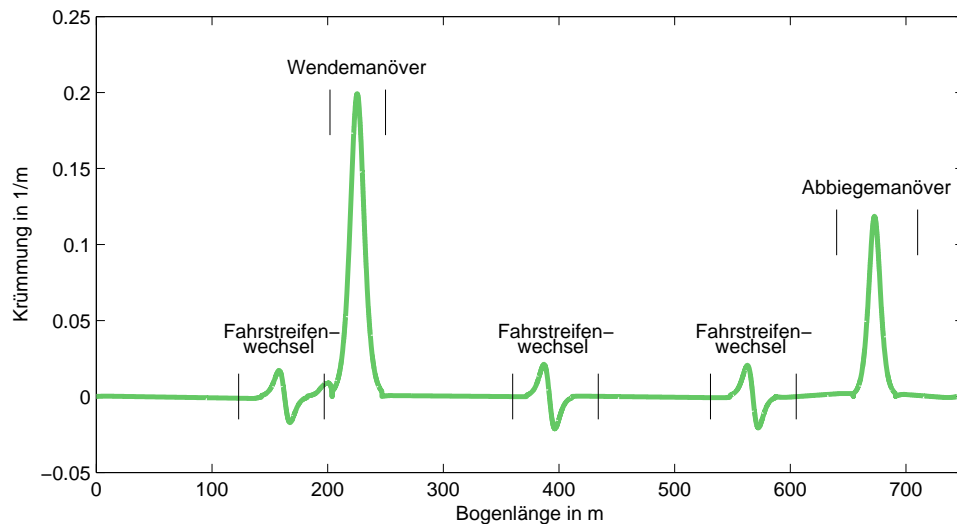


Abbildung 9.3.: Krümmungsverlauf der Trajektorie bei Planung mit Fahrmanövern, die durch Sigmoiden dargestellt werden

Simulationskurs bei einer Planung durch Fahrmanöver mit Sigmoiden und Splines.

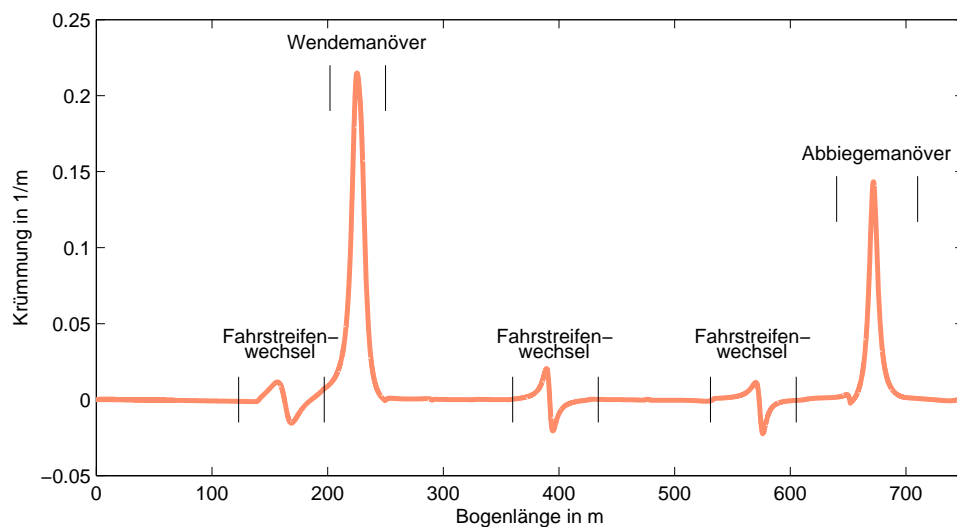


Abbildung 9.4.: Krümmungsverlauf der Trajektorie bei Planung mit Fahrmanövern, die durch Splines dargestellt werden.

Für einen direkten Vergleich der Krümmungsverläufe wird ein einzelner Fahrstreifenwechsel der Gesamttrajektorie betrachtet (Abbildung 9.5). Eine manöverübergreifende Planung berechnet vor allem an den Übergängen deutlich bessere Krümmungsverläufe.

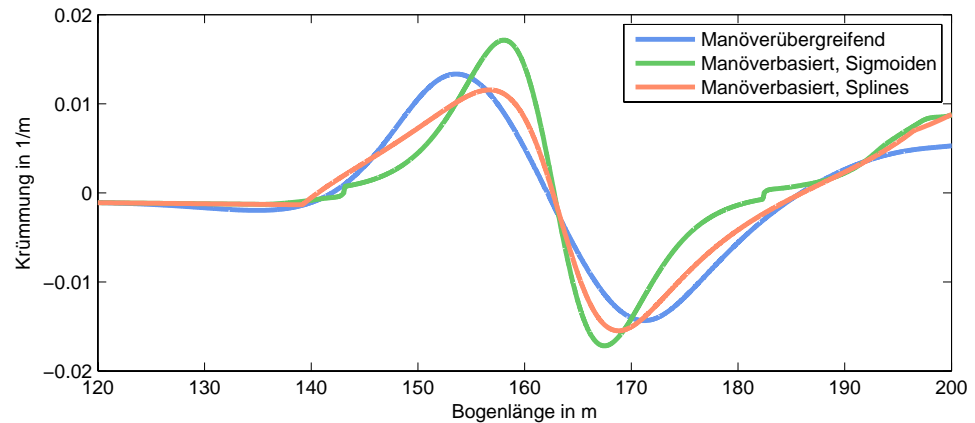


Abbildung 9.5.: Vergleich der Krümmungsverläufe der unterschiedlichen Planungsverfahren bei einem Fahrstreifenwechsel

9.1.2. Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Trajektorien der unterschiedlichen Planungsverfahren und ihre in den Abbildungen 9.2 bis 9.5 dargestellten Krümmungsverläufe werden durch ein virtuelles Fahrzeug in der Simulation abgefahren. Die Auswertung der dabei gewonnenen Simulationsergebnisse erfolgt durch die in Abschnitt 6.2 vorgestellten und in Tabelle 9.1 aufgelisteten Messgrößen und abgeleiteten Beurteilungsmaße. Die Ausprägung gibt an, ob die Gütemaße in der Literatur vorrangig als Komfortmaß oder Sicherheitsmaß verstanden werden. Für eine vereinfachte Darstellung dienen im Folgenden die in der Tabelle angegebenen Abkürzungen.

Bewertung
über Gütemaße

Abgeleitete Beurteilungsmaße

Punktzahl zur
Bewertung

Mittellinie
als Referenz

Einige Simulationsergebnisse werden direkt zur Beurteilung der unterschiedlichen Trajektorien verwendet und sind in Tabelle 9.2 zusammengestellt. Neben der direkten Verwendung von Simulationsergebnissen lassen sich einzelne aussagekräftige Gütemaße aus diesen ableiten. Tabelle 9.3 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Auswertung der abgeleiteten Beurteilungsmaße.

Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Trajektorien der unterschiedlichen Ansätze mit einer Punktzahl zwischen 0 und 100 gegenüber einer Referenz bewertet. Als Referenz wird die Mittellinie des Fahrstreifens verwendet, die auch der manöverübergreifenden Planung als Ausgangslage dient und durch sogenannte B-Splines (Vergleich Abschnitt 6.3.1) erzeugt wird. Die Mittellinie basiert rein auf dem zur Verfügung stehenden Kartenmaterial und ist unabhängig von Fahrmanövern. Sie ist daher eine nicht-optimierte manöverübergreifende Trajektorie.

Tabelle 9.1.: Bewertungskriterien zur Evaluation

<i>Gütemaß</i>	<i>Zeichen</i>	<i>S/K^a</i>
Direkt verwendete Messgrößen/Simulationsergebnisse		
Absolute maximale Querablage	d_{\max}	S
Durchschnittliche Querablage	d_{\emptyset}	S
Absoluter maximaler Lenkwinkel	δ_{\max}	S
Durchschnittlicher Lenkwinkel	δ_{\emptyset}	K
Absolute maximale Querbeschleunigung	$a_{q, \max}$	S
Durchschnittliche Querbeschleunigung	a_{\emptyset}	K
Durchschnittliche Lenkgeschwindigkeit	$\dot{\delta}_{\emptyset}$	S
Abgeleitete Beurteilungsmaße		
Standardabweichung der Lenkgeschwindigkeit	$\sigma_{\dot{\delta}}$	K
Absolutwert der Differenz aufeinanderfolgender Lenkwinkel	$I_{ D }$	K
Absoluter maximaler Querruck	\dot{a}_{\max}	S
Fläche unter Lenkwinkelgeschwindigkeitsverlauf	I_F	K
Integral über Quadrat aufeinanderfolgender Lenkwinkel	I_D	K

^aS markiert ein Sicherheitsmaß, K ein Komfortmaß

Tabelle 9.2.: Direkt zur Bewertung verwendete Simulationsergebnisse

<i>Maß</i>	<i>Einheit</i>	<i>Manöverübergreifend</i>		<i>Manöverselektiv</i>	
		<i>Mittellinie</i>	<i>Optimiert</i>	<i>Sigmoiden</i>	<i>Splines</i>
d_{\max}	m	0,2723	0,2291	0,3962	0,5210
d_{\emptyset}	m	0,04055	0,03981	0,05149	0,05655
δ_{\max}	rad	0,5200	0,4321	0,5200	0,5200
δ_{\emptyset}	rad	0,06098	0,06024	0,06070	0,05968
a_{\max}	m/s ²	5,248	3,716	4,605	3,717
a_{\emptyset}	m/s ²	0,8515	0,7288	0,8373	0,8342
$\dot{\delta}_{\emptyset}$	rad/s	0,0544	0,0342	0,0476	0,0415

Die Referenz wird mit einer Punktzahl von 50 bewertet, so dass die übrigen Verfahren relativ dazu bewertet werden. Im Sinne einer Evaluation empfiehlt es sich, zusätzlich einen Bewertungsfaktor einzuführen, der bestimmt, mit welcher Gewichtung das einzelne Gütemaß in ein Gesamtmaß eingeht. Die ausgewählte Gewichtung ist nicht durch umfangreiche Probandenstudien belegt, sondern beruht auf der subjektiven Wahrnehmung des Stadtpilot-Entwicklerteams aus Fahrversuchen.

Tabelle 9.3.: Abgeleitete Beurteilungsmaße der Simulationsergebnisse

<i>Maß</i>	<i>Einheit</i>	<i>Manöverübergreifend</i>		<i>Manöverselektiv</i>	
		<i>Mittellinie</i>	<i>Optimiert</i>	<i>Sigmoiden</i>	<i>Splines</i>
σ_{δ}	rad/s	0,1072	0,05382	0,1102	0,08846
$I_{ D }$	rad s	0,004131	0,002598	0,003616	0,003157
\dot{a}_{\max}	m/s ³	6,314	0,9815	4,325	3,145
I_F	rad	2,065	1,299	1,805	1,579
I_D	rad ² s	1,752E-06	0,4405E-07	6,560E-06	1,191E-06

Unterschiedliche
Gewichtung der
Gütemaße in der
Gesamtbewertung

Die Gütemaße mit Bezug zur Querablage gehen mit je 15 % in die Gesamtbewertung ein. Bis auf die durchschnittliche Querbewertung, deren Messdaten die größte Messunsicherheit aufweisen, werden übrige sicherheitskritische Maße mit je 10 % Anteil berücksichtigt. Komfortmaße und die durchschnittliche Querbewertung gehen mit 5 % in die Bewertung ein.

Manöverüber-
greifende Opti-
mierung zeigt
deutliche Vorteile

Eine genauere Abschätzung der Gewichtungsfaktoren erfordert die Durchführung weitergehender Studien. Entscheidend ist allerdings vor allem die Erkenntnis, dass die Planung von manöverübergreifenden Trajektorien mit dem in dieser Arbeit dargestellten Optimierungsalgorithmus in allen verwendeten Gütemaßen das vergleichsweise beste Ergebnis erzielt. Mit der Auswertung der Simulationsdaten wird die Wirksamkeit einer manöverübergreifenden Optimierung gezeigt. Im Vergleich zu Ansätzen, die Trajektorien manöverselektiv berechnen, zeigen sowohl komfort- als auch sicherheitsorientierte Gütemaße eindeutige Vorteile.

Tabelle 9.4 fasst die Auswertung der Simulationsergebnisse zusammen.

9.2. Fahrversuche mit dem Testträger Leonie

Die Fahrversuche zur Validierung der optimierten Trajektorienplanung finden in der ehemaligen Heinrich-der-Löwe-Kaserne in Braunschweig-Rautheim mit dem Versuchsträger Leonie statt. Neben einer Erprobung unter realen Testbedingungen bietet der Fahrversuch den Vorteil, dass einige Messgrößen direkt durch die Trägheitsplattform zur Verfügung stehen und nicht durch ein Fahrdynamikmodell bestimmt werden.

Tabelle 9.4.: Auswertung der Simulationsergebnisse

Maß	Gewicht	Manöverübergreifend		Manöverselektiv	
		Mittellinie	optimiert	Sigmoiden	Splines
Direkte Messgrößen					
d_{\max}	0,15	50	58	27	4
d_{\emptyset}	0,15	50	51	37	30
δ_{\max}	0,1	50	58	50	50
δ_{\emptyset}	0,05	50	51	50	51
a_{\max}	0,1	50	65	56	65
a_{\emptyset}	0,05	50	57	51	51
$\dot{\delta}_{\emptyset}$	0,1	50	69	56	62
Abgeleitete Beurteilungsmaße					
$\sigma_{\dot{\delta}}$	0,05	50	75	49	59
$I_{ D }$	0,05	50	69	56	62
\dot{a}_{\max}	0,1	50	92	66	75
I_F	0,05	50	69	56	62
I_D	0,05	50	87	0	66
Gesamtbewertung			65,2	45,5	47,9

9.2.1. Szenario auf dem Testgelände

Da das Gelände zur Abbildung des vollständigen Simulationskurses nicht ausreicht, wird ein angepasster Kurs verwendet. Wie in Abbildung 9.6 dargestellt, umfasst der Kurs drei Fahrstreifenwechsel und vier Abbiegemanöver.

An Testgelände
angepasster Kurs

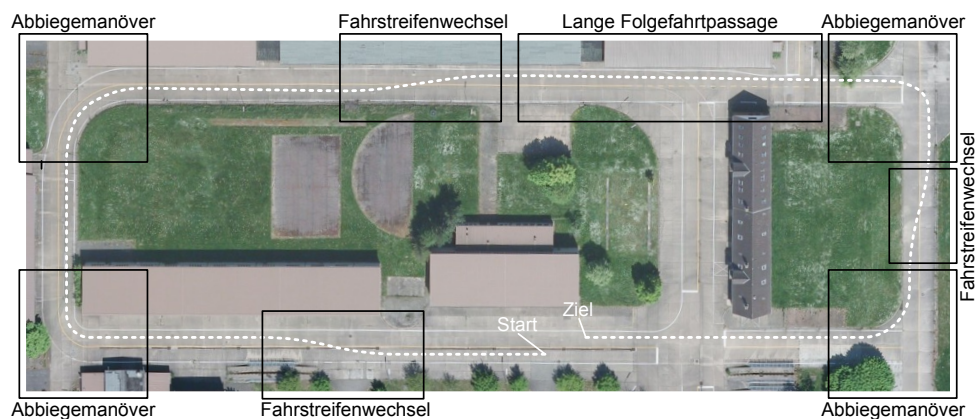


Abbildung 9.6.: Testkurs für die Fahrversuche mit dem Testträger Leonie, Luftbild: ©Stadt Braunschweig, Abteilung Geoinformation (NR. 011/2010)

Für die Längsregelung wird ein lineares Geschwindigkeitsprofil angesetzt, welches in den Kurven eine Geschwindigkeit von $4 \frac{m}{s}$ und auf den Abschnitten zum Halten eines Fahrstreifens und Fahrstreifenwechsels

Lineares Geschwin-
digkeitsprofil

ungefähr $7 \frac{m}{s}$ vorsieht. In den Übergangsphasen zwischen den zwei Stufen beträgt die Geschwindigkeitsänderung $1 \frac{m}{s}$ auf 6 m Streckenlänge.

Analog zur Simulation werden vier unterschiedliche Trajektorien vom Testträger abgefahren, wobei die Mittellinie des Fahrstreifens erneut als Referenz für die durch die drei verschiedenen Algorithmen geplanten Trajektorien dient. Abbildung 9.7 zeigt den Krümmungsverlauf der manöverübergreifend geplanten Trajektorie und den dazugehörigen Geschwindigkeitsverlauf.

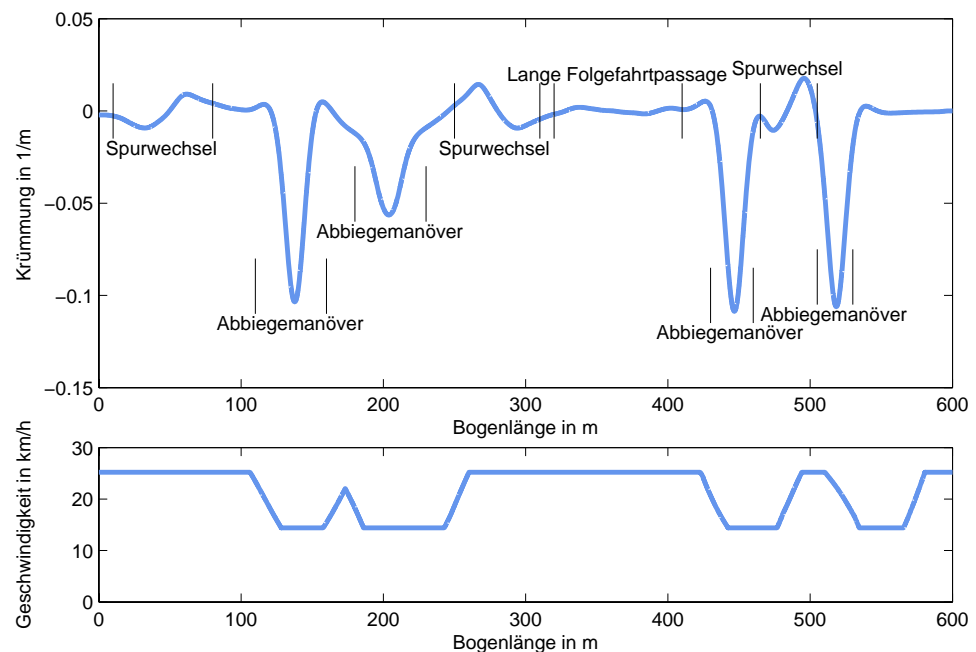


Abbildung 9.7.: Krümmungsverlauf der Trajektorie und Geschwindigkeitsvorgaben des Fahrerscheiders für den realen Fahrversuch auf dem Testgelände, geplant mit der manöverübergreifenden Trajektorienplanung.

9.2.2. Auswertung der Fahrversuche

Bei der Durchführung der realen Fahrversuche zeigten sich im Vergleich zur Simulation sehr frühzeitig deutliche Unterschiede, denn das Abfahren der Mittellinie führte dreimal zum automatischen Abschalten des autonomen Fahrbetriebs. Die Systeme zur Überwachung des Fahrzeugs, die für das automatische Abschalten verantwortlich sind, wurden in der Simulation nicht mit abgebildet, so dass ein entsprechendes Verhalten in der Simulation nicht beobachtet werden konnte.

Mittellinie erwartungsgemäß die Trajektorie mit den schlechtesten Fahreigenschaften

Die Abschaltursache bei den Fahrversuchen ist auf die geringe Qualität der Ausgangstrajektorie zurückzuführen, die aufgrund des nicht-optimierten Krümmungs- und Krümmungsänderungsverlaufs nicht darstellbare Stellgeschwindigkeiten des Lenkactuators erfordert. Abbildung 9.8 zeigt einen Ausschnitt aus dem Lenkwinkelverlauf, der aufgrund der großen Stellgeschwindigkeiten vom System als Abwurfkriterium erkannt wird. Erwartungsgemäß führt die Trajektorie in der Mitte der Fahrbahn zur subjektiv unkomfortabelsten Fahrt.

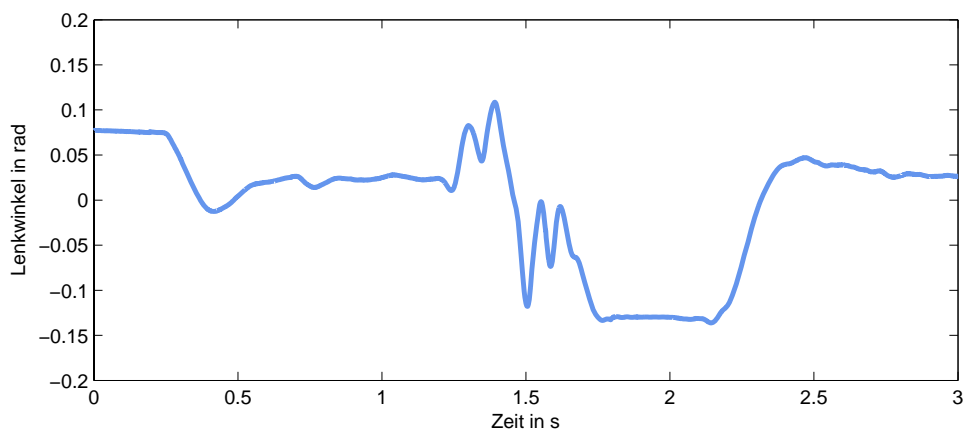


Abbildung 9.8.: Ausschnitt aus dem kommandierten Lenkwinkelverlauf beim Abfahren der Mittellinie; die hohen geforderten Lenkwinkeländerungen führen zum automatischen Abschalten des autonomen Fahrbetriebs durch die Module zur Überwachung einer autonomen Fahrt

Die Trajektorie, die sich aus der manöverselektiven Planung mittels Sigmoiden ergibt, ist im Vergleich deutlich komfortabler. Es treten allerdings weiterhin regelmäßig unerwartete Lenkbewegungen auf, die vor allem aus den Übergängen zwischen den einzelnen Fahrmanövern resultieren.

Diese Übergänge sind bei einer manöverselektiven Planung mit den Quintic G^2 -Splines weniger auffällig, so dass sich der subjektive Fahrkomfort weiter erhöht. Lediglich der letzte Fahrstreifenwechsel und das darauffolgende Abbiegemanöver weisen vergleichsweise starke Lenkbewegungen auf.

Die subjektiv angenehmste Fahrt resultiert aus der manöverübergreifenden Trajektorienplanung, die ohne Übergänge zwischen den einzelnen Abschnitten auskommt. Besonders die Kurvendurchfahrten haben sich im Vergleich zu den übrigen Trajektorien als deutlich harmonischer herausgestellt.

Unkomfortable
Lenkbewegungen
bei Sigmoiden an
den Übergängen

G^2 -Splines weniger
auffällig

Manöverüber-
greifende Trajek-
torie führt zur
subjektiv ange-
nehmsten Fahrt

Zur Objektivierung des Fahrempfindens erfolgt bei den Fahrversuchen eine Analyse anhand der zuvor eingeführten Gütemaße. In der Tabelle 9.5 sind die direkten Messgrößen aus den Fahrversuchen zusammengefasst, die als Gütekriterien verwendet werden.

Tabelle 9.5.: Direkte Messgrößen der Fahrversuche

<i>Maß</i>	<i>Einheit</i>	<i>Manöverübergreifend</i>		<i>Manöverselektiv</i>	
		<i>Mittellinie</i>	<i>Optimiert</i>	<i>Sigmoiden</i>	<i>Splines</i>
d_{\max}	m	0,9138	0,2432	0,3368	0,3066
d_{\emptyset}	m	0,2747	0,1289	0,1474	0,1386
δ_{\max}	rad	0,5765	0,3131	0,4849	0,5026
δ_{\emptyset}	rad	0,07459	0,05546	0,05954	0,05509
a_{\max}	m/s ²	3,003	1,400	2,569	2,439
a_{\emptyset}	m/s ²	0,3541	0,2844	0,3762	0,3015
$\dot{\delta}_{\emptyset}$	rad/s	0,8092	0,1425	0,2975	0,3118

Tabelle 9.6 enthält Gütemaße, die sich durch zusätzliche Berechnung aus den gemessenen Größen ableiten lassen.

Tabelle 9.6.: Abgeleitete Beurteilungsmaße aus den Fahrversuchen

<i>Maß</i>	<i>Einheit</i>	<i>Manöverübergreifend</i>		<i>Manöverselektiv</i>	
		<i>Mittellinie</i>	<i>Optimiert</i>	<i>Sigmoiden</i>	<i>Splines</i>
σ_{δ}	rad/s	0,1336	0,03789	0,08214	0,06608
$I_{ D }$	rad s	0,1034	0,02795	0,06343	0,04164
\dot{a}_{\max}	m/s ³	5,271	0,7818	4,635	2,517
I_F	rad	6,981	2,708	5,268	3,796
I_D	rad ² s	0,001024	0,00008068	0,0002392	0,0001345

Auswertung erfolgt analog zur Simulation

Analog zu der Auswertung der Simulationsergebnisse wird die Mittellinie des Fahrstreifens erneut als Referenztrajektorie angesetzt und mit einer Punktzahl von 50 bewertet. Die übrigen Trajektorien erhalten abhängig vom Unterschied zum Referenzwert eine Bewertung zwischen 0 und 100 Punkten. Die Gewichtung der einzelnen Gütemaße zueinander und die Berechnung eines Gesamtmaßes erfolgen analog zu der Auswertung der simulierten Fahrversuche in Abschnitt 9.1.2.

Fahrversuche zeigen deutliche Vorteile der Optimierung auf

Tabelle 9.7 verdeutlicht auch im realen Fahrversuch, dass die Planung von manöverübergreifenden Trajektorien mit dem in dieser Arbeit dargestellten Optimierungsverfahren deutliche Vorteile gegenüber einer manöverselektiven Planung bietet. Auffällig ist, dass die Unterschiede in den Gütemaßen bei der Auswertung der Fahrversuche etwas weniger

deutlich als bei den Simulationstests ausfallen. Neben den Vereinfachungen, die sich aus der Modellierung eines Fahrzeugs ergeben, ist dies auch auf das im Vergleich zur Simulation vereinfachte Szenario auf dem Testgelände zurückzuführen. Es wird deutlich, dass die Vorteile einer manöverübergreifenden Optimierung umso prägnanter sind, je komplexer eine Fahraufgabe ist. Wie in Abschnitt 8.2.2 bereits dargestellt, werden damit auch Fahrmanöver ermöglicht, die durch rein manöverbasierte Ansätze zur Fahrzeugführung nicht darstellbar wären.

Tabelle 9.7.: Auswertung der Fahrversuche

Maß	Gewicht	Manöverübergreifend		Manöverselektiv	
		Mittellinie	optimiert	Sigmoiden	Splines
Direkte Messgrößen					
d_{\max}	0,15	50	87	82	83
d_{\emptyset}	0,15	50	77	73	75
δ_{\max}	0,1	50	73	58	56
δ_{\emptyset}	0,05	50	63	60	63
a_{\max}	0,1	50	77	57	59
a_{\emptyset}	0,05	50	60	47	57
$\dot{\delta}_{\emptyset}$	0,1	50	91	82	81
Abgeleitete Beurteilungsmaße					
$\sigma_{\dot{\delta}}$	0,05	50	86	69	75
$I_{ D }$	0,05	50	86	69	80
\dot{a}_{\max}	0,1	50	93	56	76
I_F	0,05	50	81	62	73
I_D	0,05	50	96	88	93
Gesamtbewertung			81,6	68,3	73,0

9.3. Zusammenfassung

Sowohl in einer Simulationsumgebung als auch in realen Fahrversuchen mit dem Testträger Leonie konnten die Algorithmen zur Trajektorienplanung evaluiert werden. Die Auswertung von simulierten und realen Fahrversuchen bestätigt die Wirksamkeit einer manöverübergreifenden optimierten Trajektorienplanung zur autonomen Fahrzeugführung in städtischer Umgebung. Durch eine Evaluierung mit unterschiedlichen Gütemaßen der Fahrdynamik konnte der subjektive Fahreindruck bestätigt werden. Allerdings wird im Rahmen dieser Arbeit nur ein qualitativer Eindruck vermittelt, da die Gewichtung der einzelnen Gütemaße in der Gesamtbewertung nicht aus einer grundlegenden Probandenstudie gewonnen wurde.

Wirksamkeit des Optimierungsverfahrens durch simulierte und reale Fahrversuche bestätigt

Vorteile bei komplexen Fahraufgaben besonders deutlich

Für die Bestätigung der Wirksamkeit des Verfahrens ist jedoch entscheidend, dass eine Verbesserung in allen Gütemaßen erreicht werden konnte. Dabei hat sich herausgestellt, dass der manöverübergreifende Ansatz besonders bei komplexeren Fahraufgaben, wie sie im Stadtverkehr üblich sind, das Fahrverhalten deutlich verbessert.

TEIL IV: ABSCHLUSS

Der abschließende Teil dieser Arbeit beschreibt die ersten autonomen Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring. Er fasst die Arbeit zusammen und bewertet die Ergebnisse. Ein Ausblick auf weitere Optimierungsmöglichkeiten zeigt interessante wissenschaftliche Fragestellungen auf.

10 Autonome Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring

Aufnahme des
Testbetriebs im
Sommer 2010

Im Sommer des Jahres 2010 wurde der autonome Testbetrieb auf dem Braunschweiger Stadtring mit dem Versuchsfahrzeug Leonie aufgenommen. Seitdem finden regelmäßige Fahrten auf dem ausgewählten Teilstück des Auftaktszenarios (siehe Abschnitt 4.2.2) statt. Allein bis Ende 2010 konnten in unterschiedlichen Testreihen insgesamt mehrere hundert Kilometer autonom im realen Straßenverkehr zurückgelegt werden. Im Folgenden wird die Inbetriebnahme, die Voraussetzung für eine autonome Fahrt auf dem Stadtring ist, auf dem Testgelände sowie die Auswertung einer Reihe von Testfahrten beschrieben.

10.1. Inbetriebnahme auf dem Testgelände

Sicherheitsfahrer
vorgeschrieben

Erprobung auf
dem Testgelände

In Zusammenarbeit mit dem Land Niedersachsen und dem TÜV NORD Mobilität besteht für den Versuchsträger Leonie eine Ausnahmegenehmigung für autonome Fahrten auf dem Braunschweiger Stadtring. Voraussetzung ist, dass ein Sicherheitsfahrer alle Tests und Versuchsfahrten begleitet und bei Bedarf die Fahrzeugführung übernimmt (siehe Abschnitt 4.4.1). Bevor allerdings eine autonome Fahrt mit einem neuen Softwarestand auf dem Stadtring stattfindet, wird das System grundlegend auf einem Testgelände erprobt. Dazu dienen umfassende Fahrversuche auf dem abgesperrten Gelände der früheren Heinrich-der-Löwe-Kaserne in Braunschweig-Rautheim. Durch unterschiedliche Testreihen wird das Fahrzeugverhalten in möglichst repräsentativen Verkehrsszenen getestet.

Die Abbildungen 10.1 und 10.2 stellen zwei Beispiele für in Fahrversuchen nachgestellte Verkehrsszenen auf einem Testgelände dar. Die erste Abbildung zeigt zunächst eine Szene, die gelegentlich beim Annähern an eine rote Lichtsignalanlage im Stadtverkehr auftritt. Während der Testträger Leonie auf dem rechten Fahrstreifen an die Kreuzung heranzieht, wechselt ein Verkehrsteilnehmer aufgrund eines Rückstaus kurzfristig von dem linken Fahrstreifen in Leonies Fahrstreifen. Zwar wird der Ver-



Abbildung 10.1.: Reproduzierung einer Szene mit plötzlichem Einscherer auf dem Testgelände

kehrsteilnehmer bereits frühzeitig durch die maschinelle Wahrnehmung auf dem benachbarten Fahrstreifen erkannt, eine Reaktion auf dessen Fahraktion kann allerdings erst dann erfolgen, wenn der Fahrstreifenwechselvorgang ersichtlich ist. Aufgrund der Kurzfristigkeit steht nur eine sehr begrenzte Zeitspanne für eine Reaktion und Anpassung der Fahrstrategie in Leonies Fahrzeugführungssystem zur Verfügung. Wie in der Abbildung 10.1 dargestellt, beherrscht Leonie die Situation trotzdem zuverlässig und passt ihr Verhalten der veränderten Verkehrssituation an.

Reproduzierung
einer Fahrscene
mit plötzlichem
Einscherer

Abbildung 10.2 zeigt Kameraaufnahmen eines Tests zur Prüfung der Nothaltefähigkeiten bei plötzlich auftretenden Hindernissen auf der Fahrbahn. Während sich der Testträger annähert, wird der Fahrstreifen abrupt durch hereinfliegende Hindernisse blockiert. Leonie leitet daraufhin eine autonome Gefahrenbremsung ein.

Testen der Nothal-
tefähigkeiten



Abbildung 10.2.: Test der Nothaltefähigkeiten des Versuchsträgers auf dem Testgelände

Ziel dieser Fahrversuche auf dem Testgelände ist es, die Fähigkeiten des Fahrzeugs auf sehr kurzfristige Veränderungen im Fahrzeugumfeld zu testen. Erst dann, wenn der Testträger alle nachgestellten Verkehrsszenen sicher beherrscht, erfolgt eine autonome Fahrt auf dem Braunschweiger Stadtring.

Fahrten auf dem
Stadtring erst
nach erfolgreich
abgeschlossenen
Tests

10.2. Experimentelle Ergebnisse

Weltpremiere am
8. Oktober 2010

Vielfältige
Fähigkeiten im
Auftaktszenario

Keine automati-
sche Erkennung
des Signalbil-
des von Licht-
signalanlagen

Mit dem Versuchsträger Leonie wurden erstmals autonome Fahrten in der realen Umgebung des Braunschweiger Stadtrings gezeigt, die international Maßstäbe im Forschungsgebiet der autonomen Straßenfahrzeuge in städtischer Umgebung gesetzt haben. In einer Weltpremiere wurde Leonie am 8. Oktober 2010 der Öffentlichkeit vorgestellt und befuhr eine vorgegebene Strecke des Braunschweiger Stadtrings mehrfach autonom im alltäglichen Straßenverkehr. Die Vorführung umfasste das in Abschnitt 4.2.2 dargestellte Auftaktszenario im Nordosten des Stadtrings von der Hans-Sommer-Straße bis zur Kreuzung in die Mühlenpfordtstraße und zurück. Das Fahrzeug war dabei unter anderem in der Lage, den Fahrstreifen zu halten, Kreuzungen und Hindernisse zu beachten sowie Abstände und Geschwindigkeit an den fließenden Verkehr anzupassen. Zusätzlich wurde das aktuelle Signalbild der jeweils nächsten Lichtsignalanlage berücksichtigt, wobei die Erkennung zum Zeitpunkt der Vorführung noch nicht selbsttätig vom Fahrzeug vorgenommen wurde. Stattdessen stellte eine Begleitperson im Fahrzeug die Zustände der Lichtsignalanlagen dem System über eine Benutzeroberfläche zur Verfügung. Zukünftig ist geplant, dass die Lichtsignalanlagen ihr Signalbild über eine Funkverbindung übertragen. Abbildung 10.3 zeigt Leonie bei einer Testfahrt auf dem Stadtring.



Abbildung 10.3.: Versuchsfahrzeug Leonie bei einer Testfahrt auf dem Braunschweiger Stadtring

Im Folgenden wird eine Reihe vergleichbarer Fahrten auf dem Abschnitt des Auftaktszenarios ausgewertet, die die Leistungsfähigkeit des Versuchsträgers beschreiben. Die Testreihe umfasst insgesamt neun Fahrten mit einer Gesamtlänge von 20,62 km. Davon wurden sechs Fahrten bei Tageslicht (Tabelle 10.1) und drei Fahrten bei Dunkelheit (Tabelle 10.2) durchgeführt. Insgesamt 94,9 % der Gesamtstrecke¹ konnten vollständig autonom bewältigt werden. Die Tabellen geben die Startuhrzeit, die Dauer, die Durchschnittsgeschwindigkeit v_{\emptyset} , den Anteil der autonom zurückgelegten Strecke sowie die Ursache eines Eingriffs bei den einzelnen Fahrten an. Von den neun Testfahrten konnten sechs ohne eine

Testreihe mit neun Fahrten, 20,62 km Gesamtlänge, 94,9 % autonom bewältigt

Tabelle 10.1.: Übersicht der Testfahrten bei Tageslicht

Fahrt	Startzeit	Dauer	v_{\emptyset}	Autonom	Ursache des Eingriffs
T1	11:49:03 Uhr	6 ' 26 "	21,7 km/h	100 %	-
T2	11:56:21 Uhr	7 ' 7 "	19,3 km/h	100 %	-
T3	12:04:31 Uhr	7 ' 23 "	18,6 km/h	98,45 %	Sehr knapper Einscherer
T4	12:12:59 Uhr	6 ' 18 "	21,8 km/h	100 %	-
T5	12:20:15 Uhr	5 ' 40 "	12,9 km/h	56,72 %	GPS Position ungenau
T6	12:26:12 Uhr	5 ' 37 "	24,6 km/h	100 %	-

Interaktion des Sicherheitsfahrers vollständig autonom bewältigt werden. Die drei Fahrten T3, T5 und D2 erforderten aufgrund von nicht beherrschten Situationen oder technischen Schwierigkeiten eine Übernahme der Fahrfunktion durch den Sicherheitsfahrer.

Drei Übernahmen durch den Sicherheitsfahrer notwendig

Tabelle 10.2.: Übersicht der Testfahrten bei Dunkelheit

Fahrt	Startzeit	Dauer	v_{\emptyset}	Autonom	Ursache des Eingriffs
D1	16:40:37 Uhr	8 ' 34 "	16,3 km/h	100 %	-
D2	16:50:01 Uhr	7 ' 17 "	18,5 km/h	97 %	Fahrzeug nicht erkannt
D3	16:59:04 Uhr	5 ' 58 "	23,1 km/h	100 %	-

Der erste Eingriff war in der Fahrt T3 notwendig, in der ein anderer Verkehrsteilnehmer mit zu geringem Sicherheitsabstand direkt vor dem Versuchsträger über mehrere Fahrstreifen hinweg eine Reihe

¹Dies beinhaltet die Strecke, die autonom befahren wurde, d.h. die Überführungsfahrten, die das Fahrzeug im manuellen Fahrmodus nach jeder Fahrt wieder in die Ausgangslage zurückbringen, sind nicht Teil dieser Angabe. Werden auch die Überführungsfahrten berücksichtigt, beträgt die Gesamtlänge 21,85 km, wobei 89,6 % der Strecke autonom befahren wurden.

von Fahrstreifenwechseln vollzog. Um eine Gefährdung des Umfelds auszuschließen, wurde der autonome Fahrbetrieb vorzeitig durch den Sicherheitsfahrer unterbrochen. Die Situation ist im weiteren Verlauf dieses Abschnitts (siehe Abbildung 10.12) ausführlich beschrieben und ein Beispiel für die technischen Grenzen der aktuellen Fahrfähigkeiten.

Hardwareausfall
vom System
erkannt und
Fahrfunktion
an Sicherheits-
fahrer übergeben

Ein vom System eigenständig erkannter kritischer Zustand wurde während der Fahrt T5 aufgezeichnet. Aufgrund eines Hardwareausfalls war die Genauigkeit der Eigenpositionierung für die Aufrechterhaltung der autonomen Fahrfunktion nicht ausreichend. Der autonome Fahrbetrieb wurde daher abgebrochen und der Sicherheitsfahrer durch eine akustische Warnung zur Übernahme der Fahrzeugführung aufgefordert. Ein Neustart der Hardware konnte das Problem unmittelbar beheben.

Aufgrund eines kurzzeitigen Verlusts des vorausfahrenden Fahrzeugs als Sensorobjekt in der maschinellen Wahrnehmung wurde die Fahrt D2 unterbrochen. Wie sich im Anschluss herausstellte, war das Sensorobjekt bereits nach wenigen Rechenzyklen wieder vorhanden, so dass der Fahrbetrieb ohne Beeinträchtigung hätte fortgeführt werden können.

Tabelle 10.3 gibt eine Übersicht über die Häufigkeit der möglichen Reaktionen des Fahrzeugs auf den jeweiligen Zustand der Lichtsignalanlagen während der Testfahrten. Insgesamt werden auf dem Abschnitt

Tabelle 10.3.: Übersicht über die Häufigkeit der möglichen Reaktionen des Fahrzeugs bei Zufahrt auf Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen während der neun Testfahrten

<i>Fahrt</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>
Vollständiger Halt	6	5	5	5	5	5	6	5	4
Anfahrt unterbrochen	1	1	0	0	1	1	1	1	1
Durchgehende Grünphase	2	3	4	4	3	3	2	3	4

Auftaktszenario
enthält neun
Kreuzungen mit
Lichtsignalanlagen

des Stadtrings für das Auftaktszenario neun Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen überquert. Die Tabelle unterscheidet drei Fälle: ein vollständig autonomer Halt in einer Rotphase, eine unterbrochene Anfahrt, sofern der Zustand der Lichtsignalanlage während der Annäherung des Testträgers von „rot“ auf „grün“ umschaltet, sowie eine durchgehende Grünphase.

Die Messdaten zeigen, dass zum überwiegenden Teil ein vollständiger Halt des Versuchsträgers notwendig war. Ein Zusammenspiel automatisch und autonom fahrender Fahrzeuge mit einer optimierten Schaltung der Lichtsignalzustände bietet daher ein großes Potenzial im Hinblick auf

ein effizienteres und komfortableres Fahren. Das öffentlich geförderte Forschungsprojekt KOLINE² nimmt sich dieser Herausforderung an, indem die Lichtsignalsteuerung und der Fahrverlauf der Fahrzeuge gemeinsam optimiert werden (Koline, 2010), um mit weniger Halten und geringerem Energieverbrauch durch eine Umgebung wie den Braunschweiger Stadtring zu fahren. Der Versuchsträger Leonie dient dabei als eine zentrale Entwicklungsplattform (Saust et al., 2010).

Abbildung 10.4 gibt eine Übersicht über die bei Tageslicht durchgeführten Testfahrten. Die unterste Zeile zeigt an, in welchem Fahrmodus

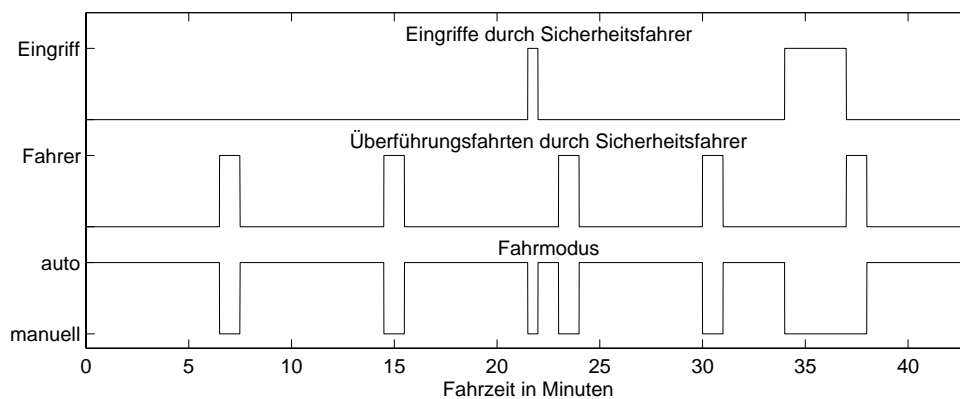


Abbildung 10.4.: Übersicht der bei Tageslicht durchgeführten Testfahrten T1–T6

(autonom, manuell) sich das Fahrzeug zum aktuellen Zeitpunkt befand. Die Überföhrungsfahrten in der zweiten Zeile finden nach Ende jeder Fahrt statt und bringen das Fahrzeug wieder in die Ausgangsposition. Die oberste Zeile zeigt die Eingriffe durch den Sicherheitsfahrer und die Eigenüberwachung des Systems. Zum Zeitpunkt $t=21'33''$ führte der sehr knappe Einscherer und zum Zeitpunkt $t=33'52''$ die mangelnde Positionsgenauigkeit zum Eingreifen der Sicherheitsmaßnahmen. Die Gesamtstrecke einschließlich der Überföhrungsfahrten beträgt insgesamt 14,57 km mit einer Gesamtfahrzeit von 43'46''.

Die Abbildung 10.5 gibt zum Vergleich die Übersicht für die in dieser Testreihe bei Dunkelheit durchgeführten Fahrten. Für eine Strecke von 7,28 km einschließlich der Überföhrungsfahrten benötigte der Testträger 23'25''. Das System zeigte sowohl bei Tageslicht als auch bei Dunkelheit den gleichen Grad an Zuverlässigkeit. Die Fahrten weisen den bereits erwähnten Eingriff durch den Sicherheitsfahrer zum Zeitpunkt

Zusammenführung mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt KOLINE

Fahrten bei Tageslicht

Fahrten bei Dunkelheit

²Kooperative und optimierte Lichtsignalsteuerung in städtischen Netzen

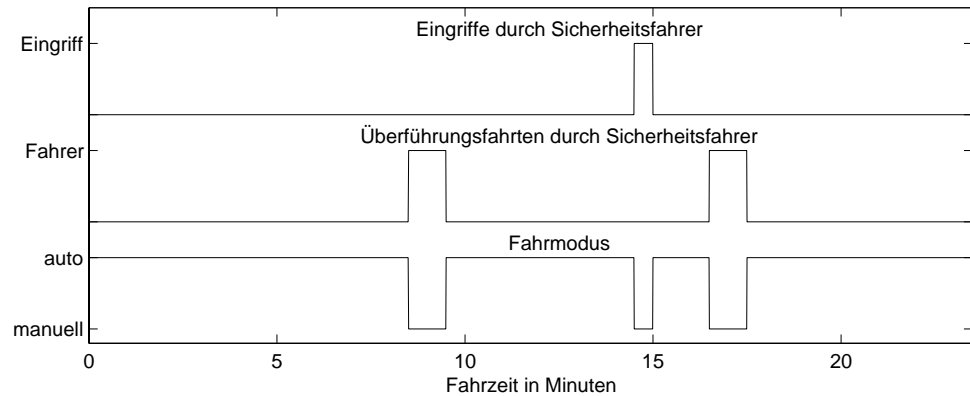


Abbildung 10.5.: Übersicht der bei Dunkelheit durchgeführten Testfahrten D1–D3

t=14'29'' auf, nachdem das vorausfahrende Fahrzeug kurzzeitig durch die maschinelle Wahrnehmung nicht erkannt wurde.

Die Stärken und Schwächen des Systems werden anhand einzelner Testfahrten im Folgenden genauer beschrieben.

Testfahrt T1: Abbildung 10.6 gibt einen Gesamtüberblick der Testfahrt T1 und beschreibt den Fahrmodus, die Phase der Lichtsignalanlage, den Längsführungsmodus sowie das dazugehörige Geschwindigkeitsprofil. Die Darstellung des Fahrmodus zeigt, dass nach der Übernahme der

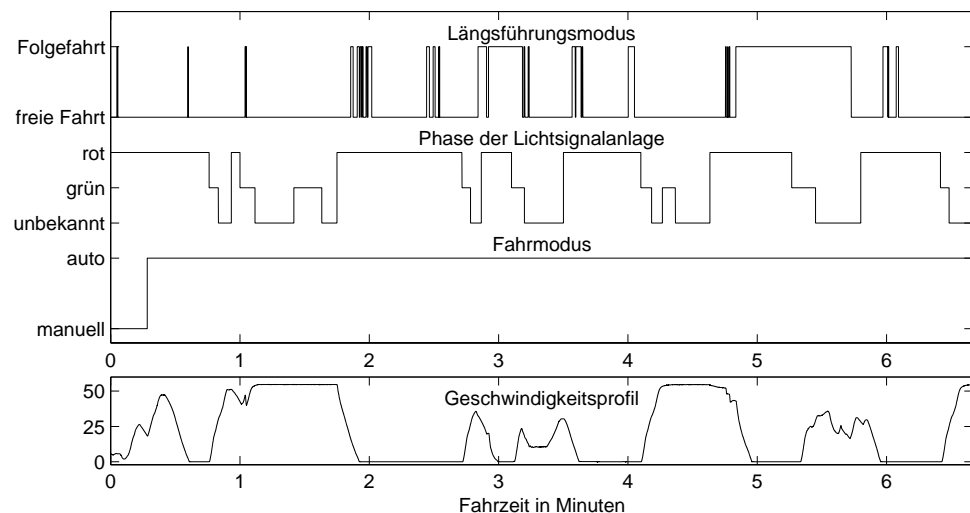


Abbildung 10.6.: Darstellung des Längsführungsmodus, der Phase der Lichtsignalanlage, des Fahrmodus und des Geschwindigkeitsprofils der Testfahrt T1

Fahrfunction durch das System nach 17 s Fahrzeit die restliche Strecke vollständig autonom bewältigt wird.

Die Phase der Lichtsignalanlage ist die Datenaufzeichnung des im System bekannten Signalbildes der jeweils nächsten Lichtsignalanlage. Über die drei Zustände „rot“, „grün“ und „unbekannt“ wird die Längsführung des Fahrzeugs beeinflusst. Der Zustand „unbekannt“ bleibt so lange bestehen, bis die Begleitperson im Fahrzeug dem System das aktuelle Signalbild mitteilt.

Der Längsführungsmodus unterscheidet zwischen einer „freien Fahrt“, bei der die Zustände der Lichtsignalanlagen und die jeweilige zulässige Höchstgeschwindigkeit in der Längsführung berücksichtigt werden, und einer „Folgefahrt“, bei der ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt ist und für die Einhaltung des Sicherheitsabstandes berücksichtigt wird. Da im Stadtverkehr sehr viele Fahrstreifenwechsel vorgenommen werden, ist ein häufiges Umschalten zwischen den Modi „freie Fahrt“ und „Folgefahrt“ notwendig. Die sehr kurzfristigen Wechsel zwischen den beiden Modi zu Beginn der Fahrt sind auf eine kurzzeitig fehlerhafte Zuordnung von Sensorobjekten auf den eigenen Fahrstreifen zurückzuführen.

Im Geschwindigkeitsprofil wird deutlich, dass die Fahrten ein weites Geschwindigkeitsspektrum aufweisen, das von längeren Halten bis hin zu längeren Passagen bei erlaubter Höchstgeschwindigkeit reicht.

Abbildung 10.7 zeigt einen Ausschnitt dieser Testfahrt, in dem Leonie auf die Kreuzung der Straßen Rebenring und Hagenring zufährt. Zu-

Häufige Wechsel zwischen Längsführungsmodi „freie Fahrt“ und „Folgefahrt“

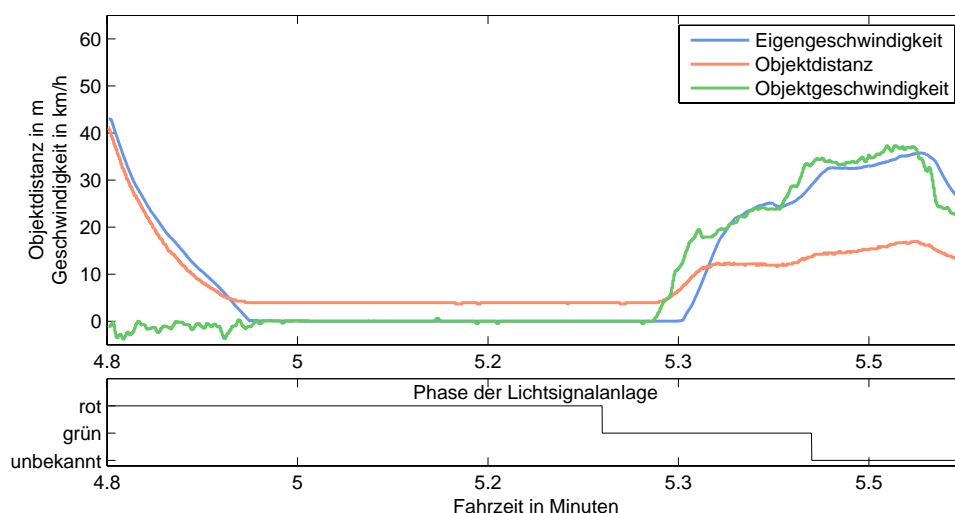


Abbildung 10.7.: Anfahrt auf eine Lichtsignalanlage mit bereits wartenden Verkehrsteilnehmern

Rote Lichtsignalanlage mit bereits wartenden Verkehrsteilnehmern

nächst steht die Lichtsignalanlage auf „rot“ und der Testträger nähert sich einem bereits wartenden Verkehrsteilnehmer bis auf wenige Meter an (Abbildung 10.8). Sobald die Lichtsignalanlage ihren Zustand auf „grün“ ändert und die vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer beschleunigen, setzt auch Leonie die Fahrt fort. Nachdem die Kreuzung überquert ist, wird der Zustand der Lichtsignalanlage auf „unbekannt“ zurückgesetzt und beschreibt damit den noch unbekannten Zustand der folgenden Lichtsignalanlage.



Abbildung 10.8.: Kameraaufnahmen aus Leonie bei Anfahrt auf eine Lichtsignalanlage mit wartendem Verkehr (Abbildung 10.7)

Testfahrt T3: Einen Gesamtüberblick über die Testfahrt T3 ist in Abbildung 10.9 gegeben. Im Unterschied zur zuvor dargestellten Fahrt T1 sind wesentlich längere „Folgefahrt“-Abschnitte enthalten, so dass die zugelassene Höchstgeschwindigkeit nur selten durch den Längsführungsmodus „freie Fahrt“ erreicht wird.

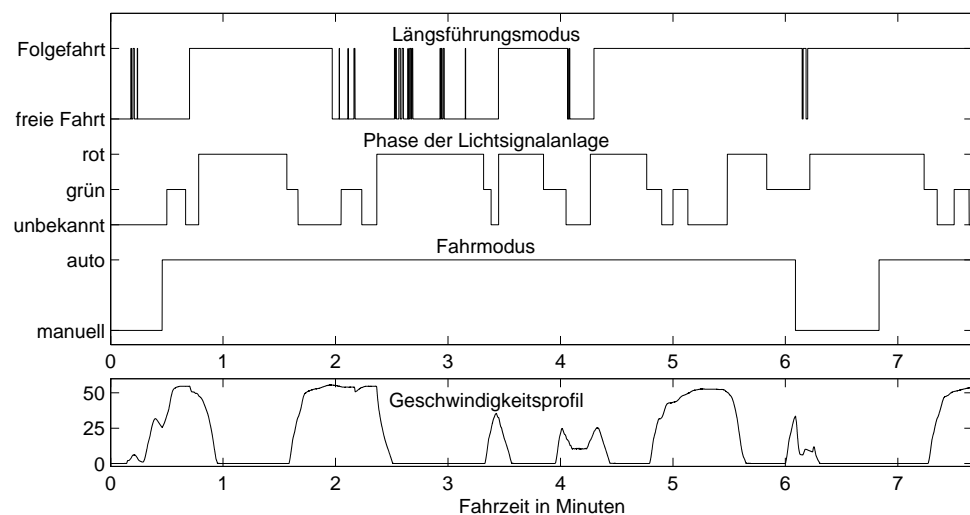


Abbildung 10.9.: Gesamtdarstellung von Testfahrt T3

Zwei interessante Szenen dieser Fahrt seien gesondert hervorgehoben. Zunächst wird nach ungefähr 2 min Fahrzeit ein Lastkraftwagen passiert,

der sehr nah an und teilweise auf der Fahrstreifenmarkierung fährt (Abbildung 10.10). Die Szene ist für alle Systemmodule, aber besonders für die maschinelle Wahrnehmung eine große Herausforderung. Nur dann, wenn die Position und die Ausmaße des Lastkraftwagens hinreichend genau erkannt werden, nutzen die Module zur Fahrzeugführung den eingeschränkten Verkehrsraum für die Vorbeifahrt.

Passieren eines
Lastkraftwagens



Abbildung 10.10.: Passieren eines Lastkraftwagens

Die Abbildung 10.11 zeigt die gemessene Eigengeschwindigkeit von Leonie sowie den internen Längsführungsmodus während der Vorbeifahrt. Aus den Kurvenverläufen wird deutlich, dass der eigene Fahrstreifen während der gesamten Zeit als frei erkannt wird, so dass die Längsführung im Fahrmodus „freie Fahrt“ verbleibt. Die Genauigkeit des Querführungssystems stellt zudem sicher, dass der enge Korridor für ein Passieren des Lastkraftwagens ausreichend ist. Der Abfall der Geschwindigkeit nach abgeschlossener Vorbeifahrt ist der Beginn des Anhaltvorgangs an der nächsten Lichtsignalanlage.

Die Kameraaufnahmen in Abbildung 10.12 zeigen die zweite interessante Szene dieser Testfahrt, bei der das System gegenwärtig an seine Grenzen stößt. Bei Anfahrt auf eine Kreuzung, bei der insgesamt fünf Fahrstreifen³ den Verkehrsfluss steuern, wechselt ein Verkehrsteilnehmer ohne ausreichenden Sicherheitsabstand von dem linken Rechtsabbiegefahrstreifen auf den Linksabbiegefahrstreifen und überquert damit auf kürzester Strecke vier Fahrstreifen. Situationen dieser Art werden bisher nicht beherrscht, so dass der Sicherheitsfahrer frühzeitig in die Fahrzeugführung eingreift. In der Abbildung 10.13 ist durch die Messkurven diese Fahrt dargestellt, bei der Leonie zunächst einem Verkehrsteilnehmer in ungefähr 25 m Entfernung folgt und sich dann diese Objektdistanz zum relevanten Objekt durch den plötzlichen Einscherer auf 5 m verkürzt. Im Unterschied zu der auf dem Testgelände reproduzierten Szene in

Nicht beherrschte
Situation: Kurz-
fristiger Einscher-
vorgang eines Ver-
kehrsteilnehmers

³ein Fahrstreifen für Linksabbieger, je zwei für Geradeausfahrer und Rechtsabbieger

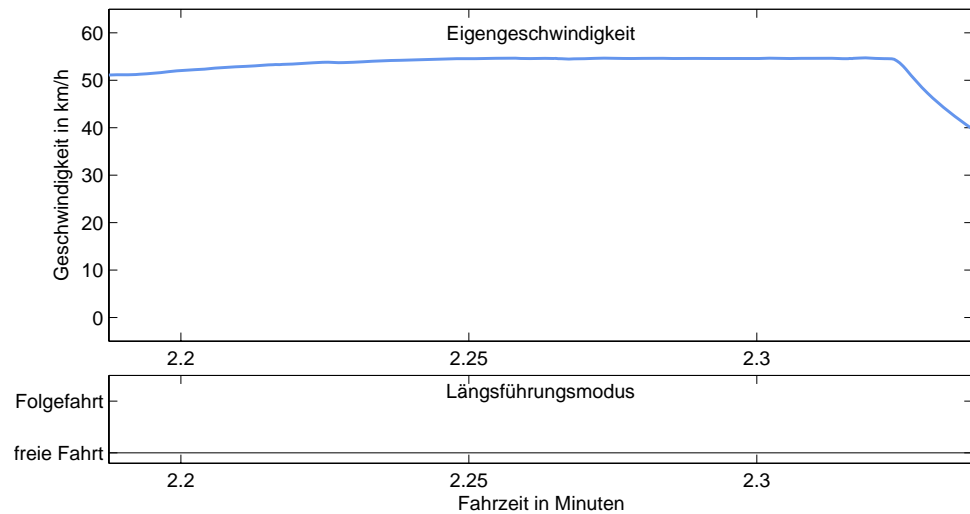


Abbildung 10.11.: Aufzeichnungen der Eigengeschwindigkeit und des Längsführungsmodus bei Vorbeifahrt an einem Lastkraftwagen (siehe Abbildung 10.10)



Abbildung 10.12.: Einschervorgang eines Verkehrsteilnehmers ohne ausreichenden Sicherheitsabstand

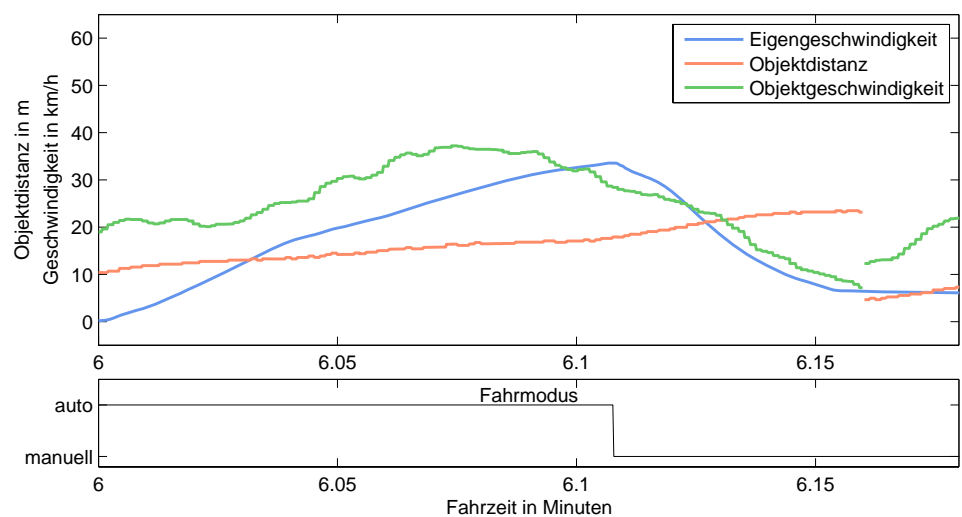


Abbildung 10.13.: Messdaten bei einer Szene mit sehr kurzfristigem Einscherer

Abbildung 10.1 wird der Verkehrsteilnehmer erst sehr spät als Einscheurer erkannt, da der Fahrvorgang auch im Stadtverkehr eher unüblich ist. Solche Situationen geschehen zwar selten, sind aber trotzdem ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zu bisher bekannten Szenarien, in denen die autonome Fahrzeugführung realisiert wurde (siehe Kapitel 2).

Testfahrt D1: In Abbildung 10.14 ist die Fahrt D1 bei Dunkelheit ausgewertet. Wie bereits eingangs dargestellt, unterscheiden sich die

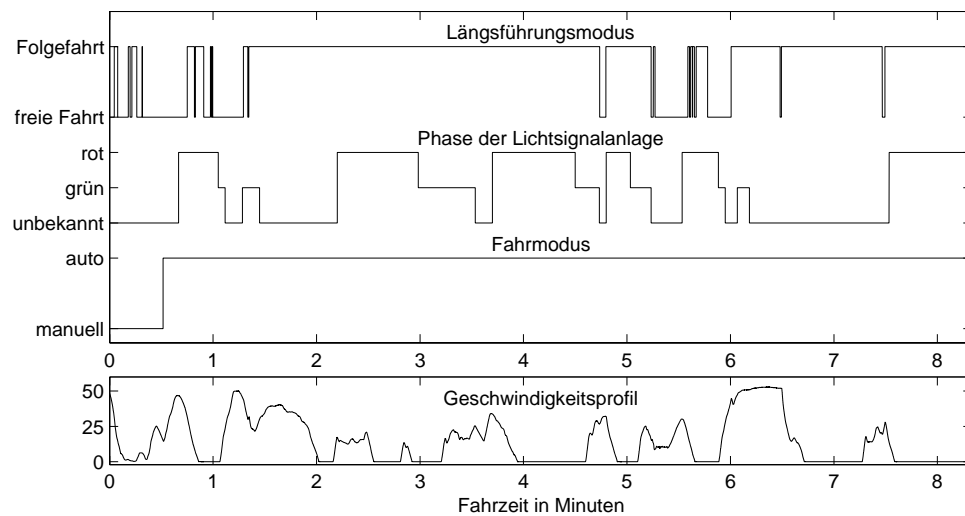


Abbildung 10.14.: Gesamtdarstellung der Testfahrt D1 bei Dunkelheit

Messdaten nicht grundlegend von Fahrten bei Tageslicht. Die Qualität der Fahrfunktion ist unabhängig von Tageszeit und -licht. Allerdings wird am Geschwindigkeitsprofil dieser Fahrt deutlich, dass zum Zeitpunkt der Messfahrt bereits der Berufsverkehr begonnen hatte, so dass ein vergleichsweise langer Zeitraum für denselben Fahrabschnitt benötigt wird.

Autonomes Fahren
im Berufsverkehr



Abbildung 10.15.: Kameraaufnahmen bei einer Testfahrt bei Dunkelheit: Der blaue Kreis markiert einen Verkehrsteilnehmer, der einen Einschervorgang auf Leonies Fahrstreifen vornimmt.

Einschervorgang
im Bereich der
erlaubten Höchst-
geschwindigkeit

Auch diese Fahrt weist wieder einige Einscherersituationen auf. Die Kameraaufnahme in Abbildung 10.15 zeigt einen Verkehrsteilnehmer, der im Bereich der erlaubten Höchstgeschwindigkeit von dem rechten auf den linken Fahrstreifen vor Leonie wechselt. Leonies System zur

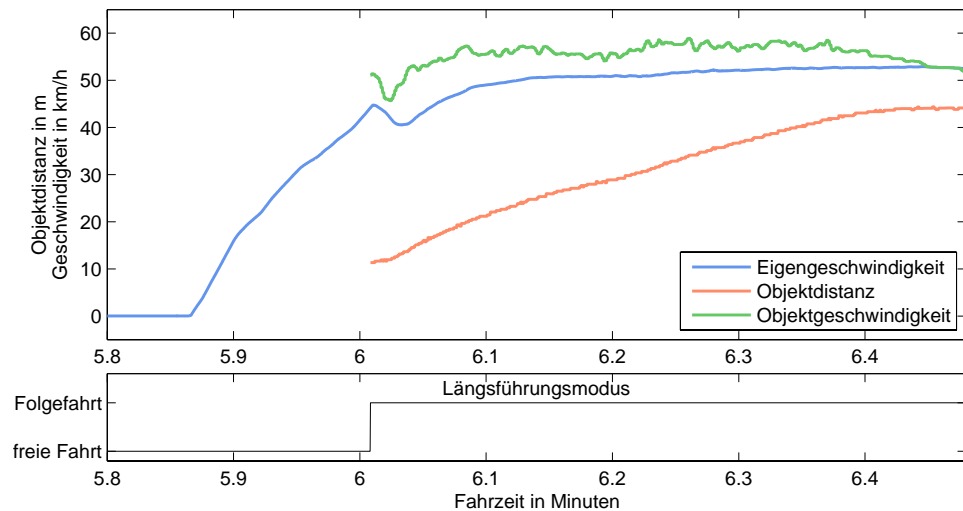


Abbildung 10.16.: Messdaten eines Einschervorgangs bei einer Testfahrt bei Dunkelheit

Fahrzeugführung schaltet daraufhin vom Modus „freie Fahrt“ in den Modus „Folgefahrt“ um und passt Geschwindigkeit und Abstand dem Einscherer an (Abbildung 10.16).

Histogramm der
Querablage ver-
deutlicht Qua-
lität des Quer-
führungssystems

Abbildung 10.17 zeigt abschließend ein Histogramm der gemessenen Querablage von der Solltrajektorie während der Testfahrt D1, die sich als repräsentativ für alle übrigen Fahrten erwiesen hat. Die Querablage

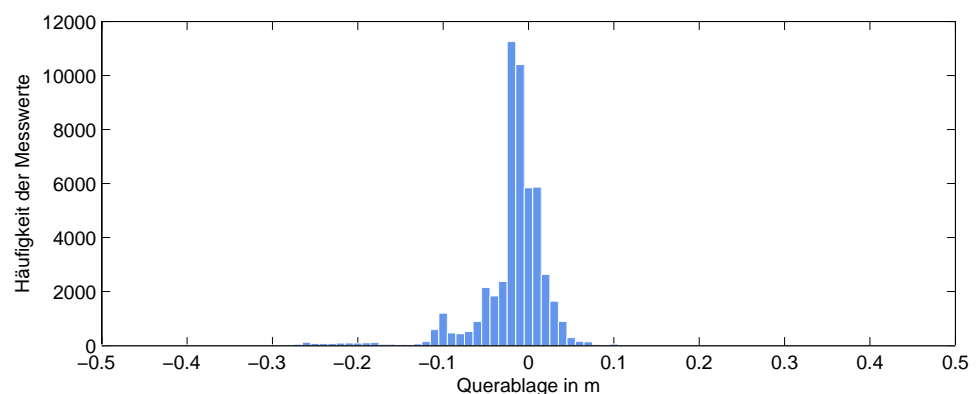


Abbildung 10.17.: Histogramm der Querablage bei der Testfahrt D1: Der Mittelwert beträgt -0,0234 m, die Standardabweichung 0,0655 m.

berechnet sich über den euklidischen Abstand zwischen der Trajektorie

und der durch die Ortung gemessenen Istposition und setzt sich daher aus einem Anteil, der aus der eigentlichen Regelabweichung resultiert, und zusätzlichen Ortungsungenauigkeiten zusammen, die sich aus der DGPS gestützten Positionierung des Fahrzeugs ergeben. Mit Ausnahme einzelner Messwerte liegt die Querablage bei autonomer Fahrzeugführung innerhalb eines Wertebereiches von ± 10 cm und unterstreicht damit die Güte des Querführungssystems bestehend aus der manöverübergreifenden Trajektorienplanung und den Algorithmen zur Querregelung.

11 Schlussbetrachtung

11.1. Zusammenfassung

Mit dem Projekt Stadtpilot nimmt sich eine Forschergruppe der Technischen Universität Braunschweig der Herausforderung einer autonomen Fahrzeugführung in realer städtischer Umgebung an. Die Erfahrungen aus der Finalteilnahme eines Braunschweiger Forscherteams an der DARPA Urban Challenge werden mit den Versuchsträgern Henry und Leonie in die Umgebung des Braunschweiger Stadtrings übertragen. Durch den Übergang in eine reale städtische Verkehrsumgebung mit nicht beeinflussten und teilweise unkooperativen Verkehrsteilnehmern steigt die Vielfalt an Verkehrssituationen signifikant an. Die Stadtpilot-Szenarien behandeln neue, größtenteils bisher unerforschte Situationen, so dass das Leistungsspektrum der neuen Testträgergeneration wesentliche Erweiterungen im Vergleich zum Vorgängerfahrzeug Caroline erfordert. Das Projekt Stadtpilot mit seinen langfristig angelegten wissenschaftlichen Zielen unterscheidet sich grundlegend von den Rahmenbedingungen der DARPA-Wettbewerbe, bei denen die Fahrzeuge für diesen einmaligen Anwendungsfall konzipiert wurden.

Die Analyse der Rahmenbedingungen des Braunschweiger Stadtrings hat gezeigt, dass sich die Anforderungen an das System zur Fahrzeugführung grundsätzlich von bisherigen unterscheiden. Reale städtische Umgebungen sind durch die hohe Anzahl an Fahrmanövern und deren Variabilität derart vielfältig, dass die Abbildung durch ein rein manöverbasiertes System zur Fahrzeugführung nicht sinnvoll ist. Stattdessen wird im Projekt Stadtpilot eine manöverübergreifende Fahrzeugführung gewählt. Während sich wiederkehrende Situationen durch ein im System hinterlegtes Regelwerk explizit abbilden lassen, besteht die Möglichkeit, weniger strukturierte Szenen durch eine implizite, verhaltensbasierte Darstellung abzubilden. Darüber hinaus wird durch eine große Anzahl aufeinanderfolgender Manöver eine manöverübergreifende Optimierung sinnvoll, die auch Aspekte des Fahrkomforts ausreichend berücksichtigt. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Ansatz zur Generierung

Reale städtische
Verkehrsumgebung

Fähigkeiten des
Vorgängerfahr-
zeugs wesent-
lich erweitert

Vielfalt des
Stadtverkehrs

Regelbasierte vs.
verhaltensbasierte
Fahrzeugführung

von Trajektorien entwickelt, die Fahrverhalten manöverübergreifend und unabhängig vom gewählten Ansatz zur Entscheidungsfindung fahrdynamisch optimiert in realer städtischer Umgebung umsetzen. Die Fahraufgaben der Entscheidungsfindung werden dabei durch einen Fahrkorridor abgebildet, der vorgibt, wie eine Situation kollisionsfrei und regelkonform befahren wird. Einer Trajektorienplanung bleiben damit weitreichende Optimierungsmöglichkeiten.

Manöverübergreifende Fahrzeugführung

Das System zur optimierten Umsetzung von Fahrentscheidungen basiert auf einer dreistufigen Trajektorienplanung, die innerhalb des gegebenen Korridors sowohl Stützstellen positioniert als auch in Bezug auf Querbeschleunigung und Stellaktivität optimierte Trajektorien berechnet. Der erste Schritt besteht aus einem analytischen Teil zur Initialisierung und Typisierung von Stützstellen und dient dem zweiten Optimierungsschritt als Grundlage, Stützstellen derart zu positionieren, dass die Krümmungsmaxima einer Trajektorie minimiert werden. Im letzten Schritt erfolgt über ein Glättungsverfahren die Bestimmung der finalen Trajektorie. Besonders auf kurvenreichen Strecken und bei komplexen Fahrmanövern erreicht dieses System einen neuen Grad der Optimierung. Das vorgestellte analytische Optimierungsverfahren zur manöverübergreifenden Trajektorienplanung ermöglicht im Vergleich zu manöverselektiven Verfahren autonome Fahrten mit höherer Querführungsgenauigkeit bei gleichzeitig niedrigerer Stellaktivität des Lenkaktuators. Die Echtzeitfähigkeit des Optimierungsalgorithmus erlaubt den Einsatz für eine Planung während der Fahrt, wodurch sich der vorgestellte Ansatz von anderen Optimierungsverfahren abhebt. Über das eingeführte Toleranzband besteht die Möglichkeit, den Grad der Optimierung zu beeinflussen. Ein Präzisionsgewinn in der Umfelderkennung und Fahrzeugortung wird durch Aufweitung dieses Bandes direkt in einen verbesserten Trajektorienverlauf abgebildet und führt damit zu einem weiter verbesserten Fahrverhalten.

Höhere Querführungsgenauigkeit

In einer Fahrdynamiksimulation und in Fahrversuchen wurde das vorgestellte System zur manöverübergreifenden Fahrzeugführung mit etablierten Systemen verglichen, die autonomes Fahren manöverselektiv realisieren. Die Bewertung mit in der Fahrdynamik üblichen Gütemaßen hat die Wirksamkeit und das Potenzial des manöverübergreifenden Ansatzes bestätigt, der in dem im Vergleich zu bisherigen Szenarien vielfältigen Stadtverkehr ein besonders ruhiges und sicheres Fahrverhalten ermöglicht. Je komplexer die Fahraufgabe ist, desto deutlicher fällt

Fahrversuche belegen die Qualität des Querführungssystems

die Verbesserung im Fahrverhalten durch eine manöverübergreifende Abhandlung aus.

11.2. Ausblick

Weitere Szenarien
werden folgen

Seit Mitte des Jahres 2010 haben autonome Fahrten in größerem Umfang auf dem Braunschweiger Stadtring stattgefunden und es konnten eine Reihe eindrucksvoller Erfolge erzielt werden. Als Auftaktszenario wurde dabei ein Abschnitt im Nordosten des Stadtrings gewählt. Diese ersten Fahrten und die Beherrschung grundlegender Verkehrsszenen bietet die Ausgangslage für weitere Szenarien rund um den Stadtring. Es gilt, die Fähigkeiten des Systems stufenweise zu erweitern.

Loslösung vom
Kartenmaterial

In der Fahrzeugführung bietet es sich an, das aktuelle System weiter zu generalisieren. Das in dieser Arbeit vorgestellte System zur Fahrzeugführung, das manöverübergreifend Fahrentscheidungen umsetzt, basiert in der aktuellen Ausführung auf einem sehr genauen Kartenmaterial. Die manöverübergreifende Trajektorienplanung benötigt das Kartenmaterial in erster Linie für die Fähigkeit, Kurven optimiert anzufahren. Eine Karte, in Form eines gerichteten Graphen, hat einen ähnlichen Informationsgehalt, so dass auch damit eine gleichwertige Vorausschau erreicht wird. In einer weiteren Ausbaustufe des Fahrzeugführungssystems wäre es daher interessant, Karten mit geringerer Genauigkeit zu verwenden. Der maschinellen Wahrnehmung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, denn die Verhaltensfähigkeiten des Fahrzeugs sind vorrangig abhängig von der Güte der Wahrnehmung.

Anwendung in
Assistenzsystemen

Im Verlauf dieser Arbeit wurde zudem eine Anwendung der Trajektorienplanung in Fahrerassistenzsystemen gezeigt, die nicht auf einem hochgenauen Kartenmaterial, sondern auf einem durch die Sensorik erkannten Fahrkorridor basiert. Auch hier sind viele weitere Funktionsausprägungen denkbar, die in einem zunehmenden Maße den Fahrer bei den Aufgaben der Fahrzeugführung entlasten.

ANHANG

A Kubischer Smoothing Spline

Der in der Trajektorienplanung eingesetzte Smoothing Spline basiert auf einem quadratischen Gütefunktional, das aus je einem Term zur Glättung und Approximation von Daten besteht (de Boor, 2001):

$$J = p \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\delta y_i} \right) + (1 - p) \int_{x_1}^{x_0} (f''(s))^2 ds \quad (\text{A.1})$$

Während der erste Term an einer Stützstelle x_i die Differenz zwischen dem Funktionswert $f(x_i)$ des zu konstruierenden Splines und den ursprünglichen Werten y_i gewichtet, berücksichtigt der zweite Term die gesamte Biegung des Splines durch die Bildung des Integrals der quadrierten zweiten Ableitung (Hoschek u. Lasser, 1992). Durch den Parameter $p \in (0; 1)$ wird der Einfluss der beiden Terme auf das Gütefunktional festgelegt.

Die allgemeine Form eines Segments f_i eines kubischen Splines f zwischen den Stützstellen x_i und x_{i+1} lautet:

$$f_i(x) = a_i + b_i (x - x_i) + c_i (x - x_i)^2 + d_i (x - x_i)^3, \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{A.2})$$

Die Ableitungen folgen zu:

$$f'_i(x) = b_i + 2 c_i (x - x_i) + 3 d_i (x - x_i)^2 \quad (\text{A.3})$$

$$f''_i(x) = 2 c_i + 6 d_i (x - x_i) \quad (\text{A.4})$$

$$f'''_i(x) = 6 d_i \quad (\text{A.5})$$

Die Gleichungen

$$f_i(x_i) = a_i \quad (\text{A.6})$$

$$f_i(x_{i+1}) = a_i + b_i \Delta x_i + c_i \Delta x_i^2 + d_i \Delta x_i^3 \quad (\text{A.7})$$

$$f''_i(x_i) = 2 c_i \quad (\text{A.8})$$

$$f''_i(x_{i+1}) = 2 c_i + 6 d_i \Delta x_i \quad (\text{A.9})$$

ergeben sich, wenn in A.2 und dessen zweiter Ableitung f_i'' die Intervallgrenzen x_i, x_{i+1} für $i = 1, \dots, N-1$ eingesetzt werden. Δx_i bezeichnet die Vorwärtsdifferenz $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$.

Durch Umstellen von A.9 lassen sich die Polynomkoeffizienten a_i bis d_i berechnen:

$$a_i = f_i(x_i) \quad (\text{A.10})$$

$$b_i = \frac{f_i(x_{i+1}) - f_i(x_i)}{\Delta x_i} - \frac{f_i''(x_i)}{2} \Delta x_i - \frac{f_i''(x_{i+1}) - f_i''(x_i)}{6} \Delta x_i \quad (\text{A.11})$$

$$c_i = \frac{f_i''(x_i)}{2} \quad (\text{A.12})$$

$$d_i = \frac{f_i''(x_{i+1}) - f_i''(x_i)}{6 \Delta x_i} \quad (\text{A.13})$$

Aus der Rahmenbedingung eines glatten Splinesverlaufs resultiert die Forderung, dass der Spline sowie die ersten beiden Ableitungen an den Intervallgrenzen stetig sind (Schanz, 2000):

$$f_{i-1}(x_i) = f_i(x_i) \quad (\text{A.14})$$

$$f'_{i-1}(x_i) = f'_i(x_i) \quad (\text{A.15})$$

$$f''_{i-1}(x_i) = f''_i(x_i) \quad (\text{A.16})$$

Aus A.15 folgt durch Einsetzen:

$$\begin{aligned} & \frac{f_i(x_{i+1}) - f_i(x_i)}{\Delta x_i} - \frac{f_{i-1}(x_i) - f_{i-1}(x_{i-1})}{\Delta x_{i-1}} = \\ & \frac{2 f_{i-1}''(x_i) + f_{i-1}''(x_{i-1})}{6} \Delta x_{i-1} + \frac{f_i''(x_{i+1}) + 2 f_i''(x_i)}{6} \Delta x_i. \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

Zusammen mit den Polynomkoeffizienten A.10 und A.12, der Gleichung A.16, der sogenannten natürlichen Randbedingung $f''(x_1) = f''(x_N) = 0$ und $\Delta a_i = a_{i+1} - a_i$ ergibt sich für $i = 2, \dots, N-1$ folgendes Gleichungssystem (de Boor, 2001):

$$c_1 = 0 \quad (\text{A.18})$$

$$c_{i-1} \Delta x_{i-1} + 2 c_i (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i) + c_{i+1} \Delta x_i = 3 \left(\frac{\Delta a_i}{\Delta x_i} - \frac{\Delta a_{i-1}}{\Delta x_{i-1}} \right) \quad (\text{A.19})$$

$$c_N = 0 \quad (\text{A.20})$$

Wenn f und f'' an den jeweiligen Intervallgrenzen x_i und x_{i+1} bekannt sind, wird der gesuchte Spline f zur Lösung des Minimierungsproblems A.1 vollständig in dem Intervall $[x_i, x_{i+1}]$ beschrieben. Als nächstes erfolgt die Bestimmung der unbekannten Funktionswerte.

Über $\mathbf{c} = (c_2 \dots c_{N-1})^T$ und $\mathbf{a} = (a_1 \dots a_N)^T$ wird A.18 umgeformt zu

$$\underline{\underline{R}} \mathbf{c} = 3 \underline{\underline{Q}}^T \mathbf{a} \quad (\text{A.21})$$

$\underline{\underline{R}}$ beschreibt dabei eine tridiagonal-symmetrische $((n-2) \times (n-2))$ -Matrix, die aus folgenden Spalten besteht:

$$[\Delta x_{i-1} \quad 2(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i) \quad \Delta x_i]$$

mit der Form

$$\underline{\underline{R}} = \begin{bmatrix} 2(\Delta x_1 + \Delta x_2) & \Delta x_2 & 0 & 0 & 0 \\ \Delta x_2 & 2(\Delta x_2 + \Delta x_3) & \Delta x_3 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \Delta x_{n-3} & 2(\Delta x_{n-3} + \Delta x_{n-2}) & \Delta x_{n-2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta x_{n-2} & 2(\Delta x_{n-2} + \Delta x_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (\text{A.22})$$

$\underline{\underline{Q}}$ ist eine tridiagonale $((n-2) \times n)$ Matrix mit den Spalten

$$\left[\frac{1}{\Delta x_{i-1}} \quad \frac{1}{\Delta x_{i-1}} - \frac{1}{\Delta x_i} \quad \frac{1}{\Delta x_i} \right]$$

und der Form

$$\underline{\underline{Q}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta x_1} & \frac{1}{\Delta x_1} - \frac{1}{\Delta x_2} & \frac{1}{\Delta x_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\Delta x_2} & \frac{1}{\Delta x_2} - \frac{1}{\Delta x_3} & \frac{1}{\Delta x_3} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \frac{1}{\Delta x_{n-2}} & \frac{1}{\Delta x_{n-2}} - \frac{1}{\Delta x_{n-1}} & \frac{1}{\Delta x_{n-1}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.23})$$

Das Integral des Gütefunktional J kann durch

$$p \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - f(x_i)}{\delta y_i} \right) + \frac{4(1-p)}{3} \sum_{i=1}^{n-1} \Delta x_i (c_i^2 + c_i c_{i+1} + c_{i+1}^2) \quad (\text{A.24})$$

beschrieben werden, da für einen kubischen Spline die zweite Ableitung $f''(x)$ eine lineare Funktion ist.

Die $(n \times n)$ -Diagonalmatrix D in der Form

$$D = \begin{bmatrix} \delta y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta y_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta y_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

führt zu:

$$p(\mathbf{y} - \mathbf{a})^T \underline{\underline{D}}^{-2}(\mathbf{y} - \mathbf{a}) + \frac{2}{3}(1-p) \mathbf{c}^T \underline{\underline{R}} \mathbf{c}. \quad (\text{A.26})$$

Ist das Gleichungssystem

$$p \underline{\underline{D}}^{-2}(\mathbf{y} - \mathbf{a}) = 2(1-p) \underline{\underline{Q}} \mathbf{c} \quad (\text{A.27})$$

erfüllt, wird A.26 minimal (de Boor, 2001).

Einsetzen von A.21 und Multiplizieren mit $3 \underline{\underline{Q}}^T \underline{\underline{D}}^2$ ergibt:

$$\left(6(1-p) \underline{\underline{Q}}^T \underline{\underline{D}}^2 \underline{\underline{Q}} + p \underline{\underline{R}} \right) \mathbf{c} = 3p \underline{\underline{Q}}^T \mathbf{y}. \quad (\text{A.28})$$

Aus $\mathbf{c} = 3p\mathbf{u}$ folgt:

$$\left(6(1-p) \underline{\underline{Q}}^T \underline{\underline{D}}^2 \underline{\underline{Q}} + p \underline{\underline{R}} \right) \mathbf{u} = \underline{\underline{Q}}^T \mathbf{y}. \quad (\text{A.29})$$

\mathbf{u} ergibt sich entsprechend zu:

$$\mathbf{u} = \left(6(1-p) \underline{\underline{Q}}^T \underline{\underline{D}}^2 \underline{\underline{Q}} + p \underline{\underline{R}} \right)^{-1} \underline{\underline{Q}}^T \mathbf{y}. \quad (\text{A.30})$$

Schließlich folgt aus Gl. A.27 die Lösung für \mathbf{a} :

$$\mathbf{a} = \mathbf{y} - 6(1-p) \underline{\underline{D}}^2 \underline{\underline{Q}} \mathbf{u}. \quad (\text{A.31})$$

Der gesamte Smoothing Spline lässt sich nun vollständig beschreiben, da die fehlenden Koeffizienten b_i und d_i nun aus den Gleichungen A.11 und A.13 bestimmbar sind, wobei $\Delta c_i = c_{i+1} - c_i$ ist:

$$d_i = \frac{\Delta c_i}{3 \Delta x_i} \quad (\text{A.32})$$

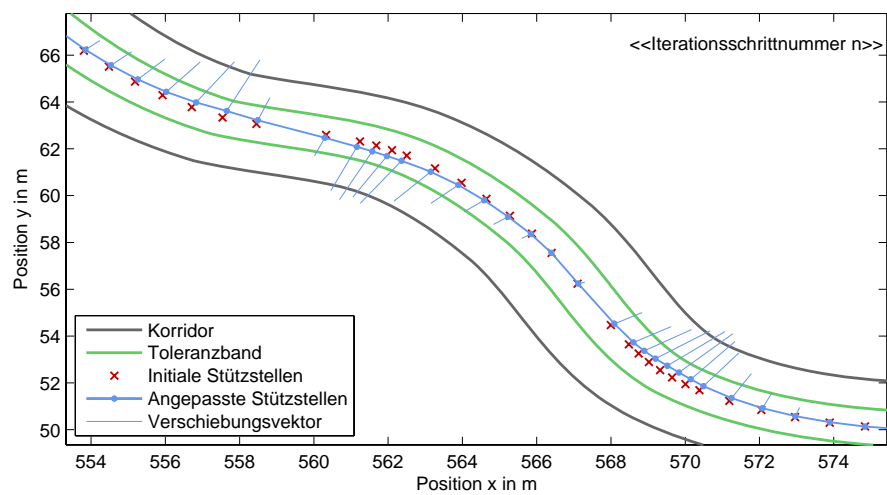
$$b_i = \frac{\Delta a_i}{\Delta x_i} - (c_i + d_i \Delta x_i) \Delta x_i \quad (\text{A.33})$$

■

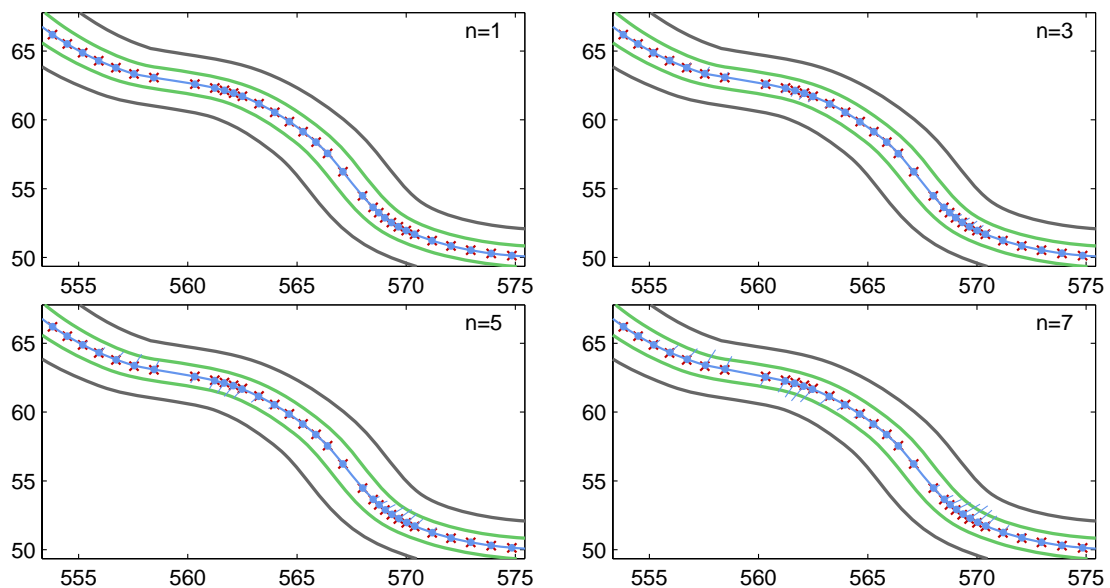
B Iterative Optimierung

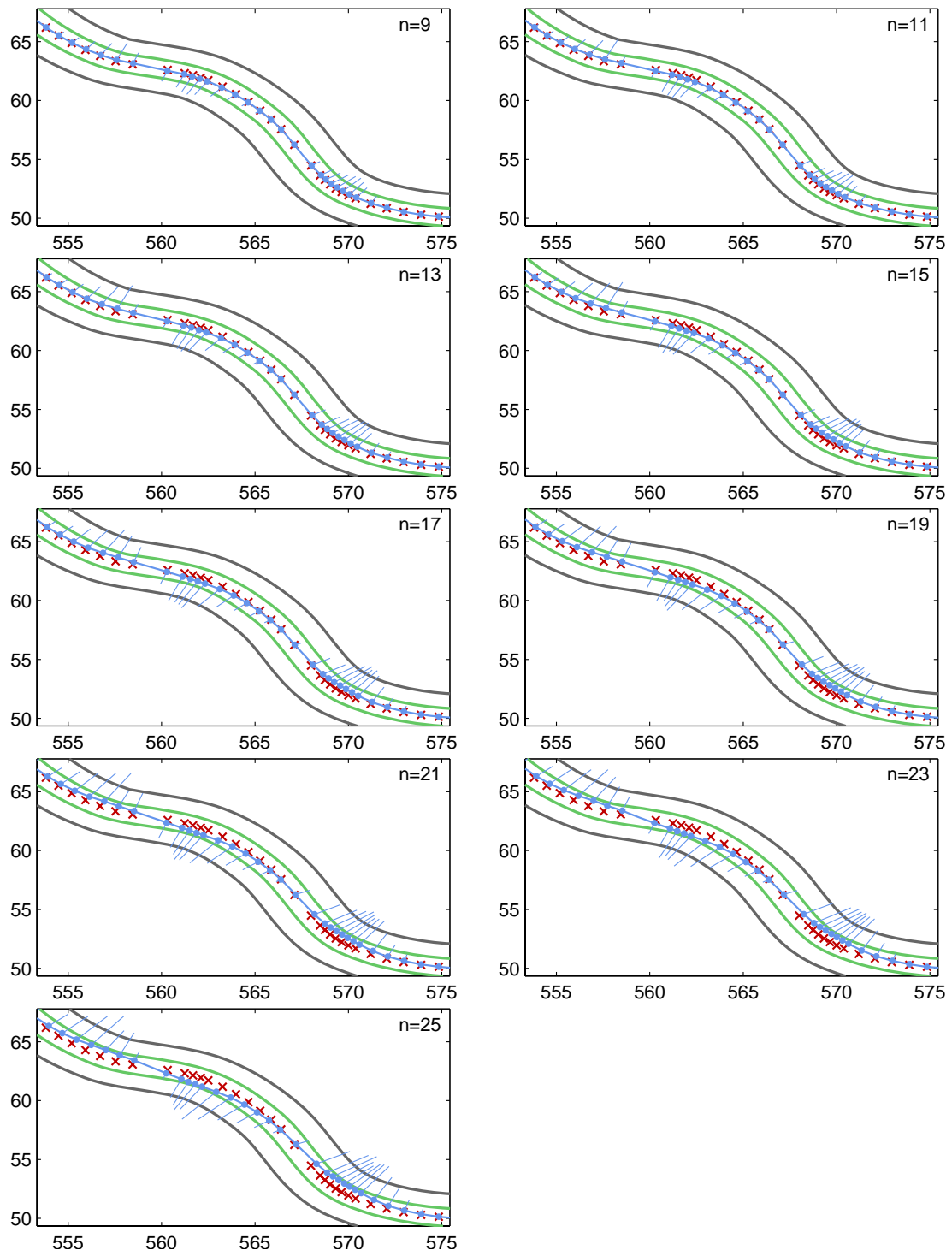
B.1. Optimierung im Toleranzband

B.1.1. Legende



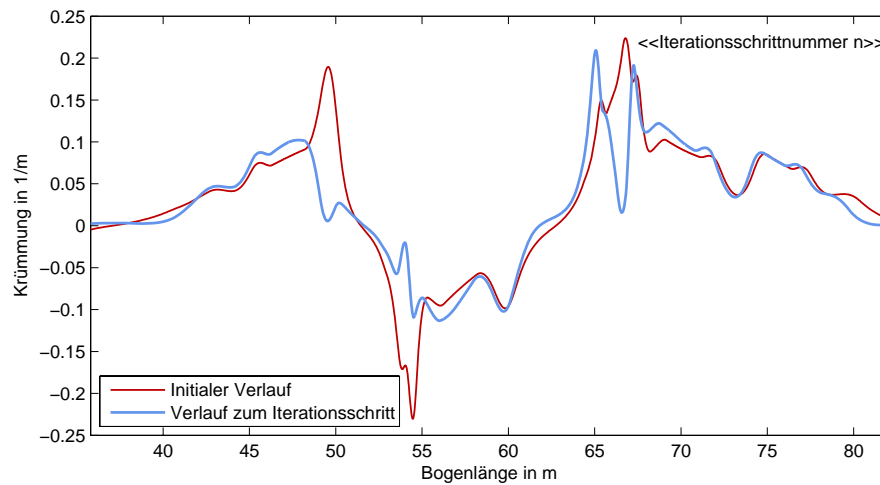
B.1.2. Trajektorienverlauf



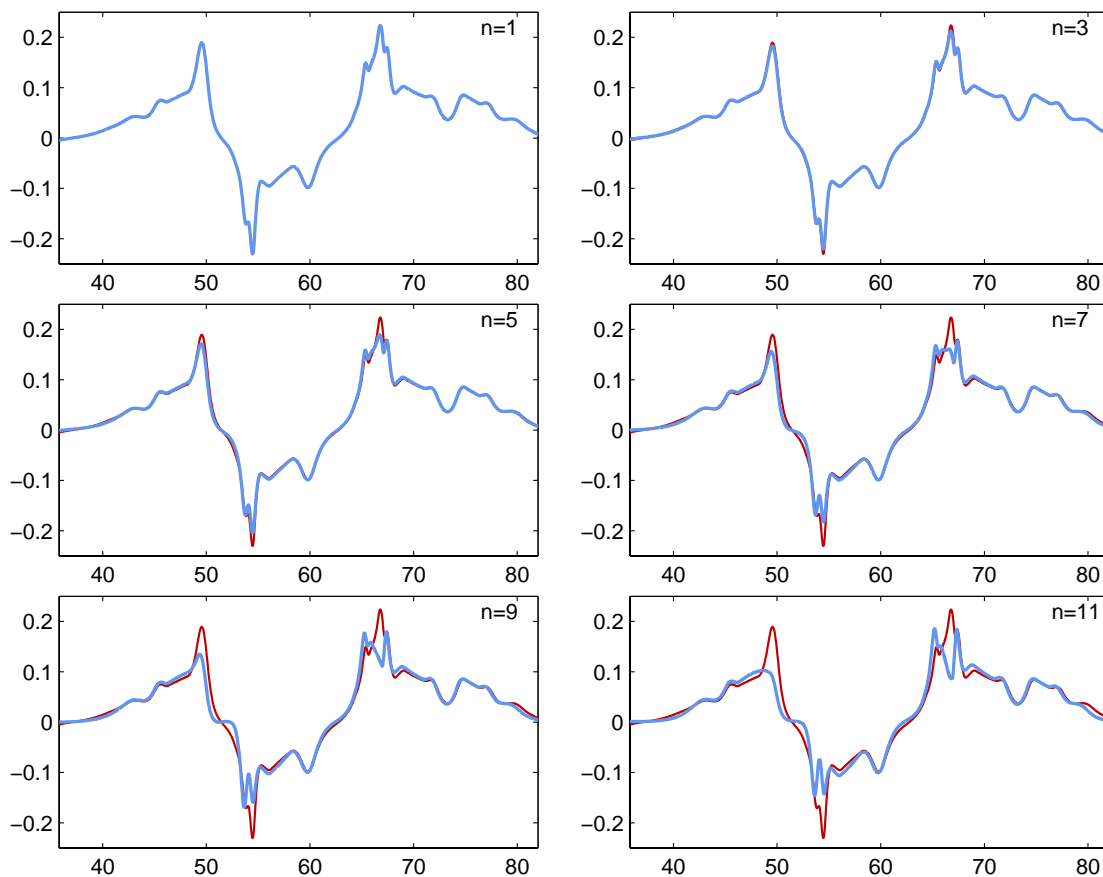


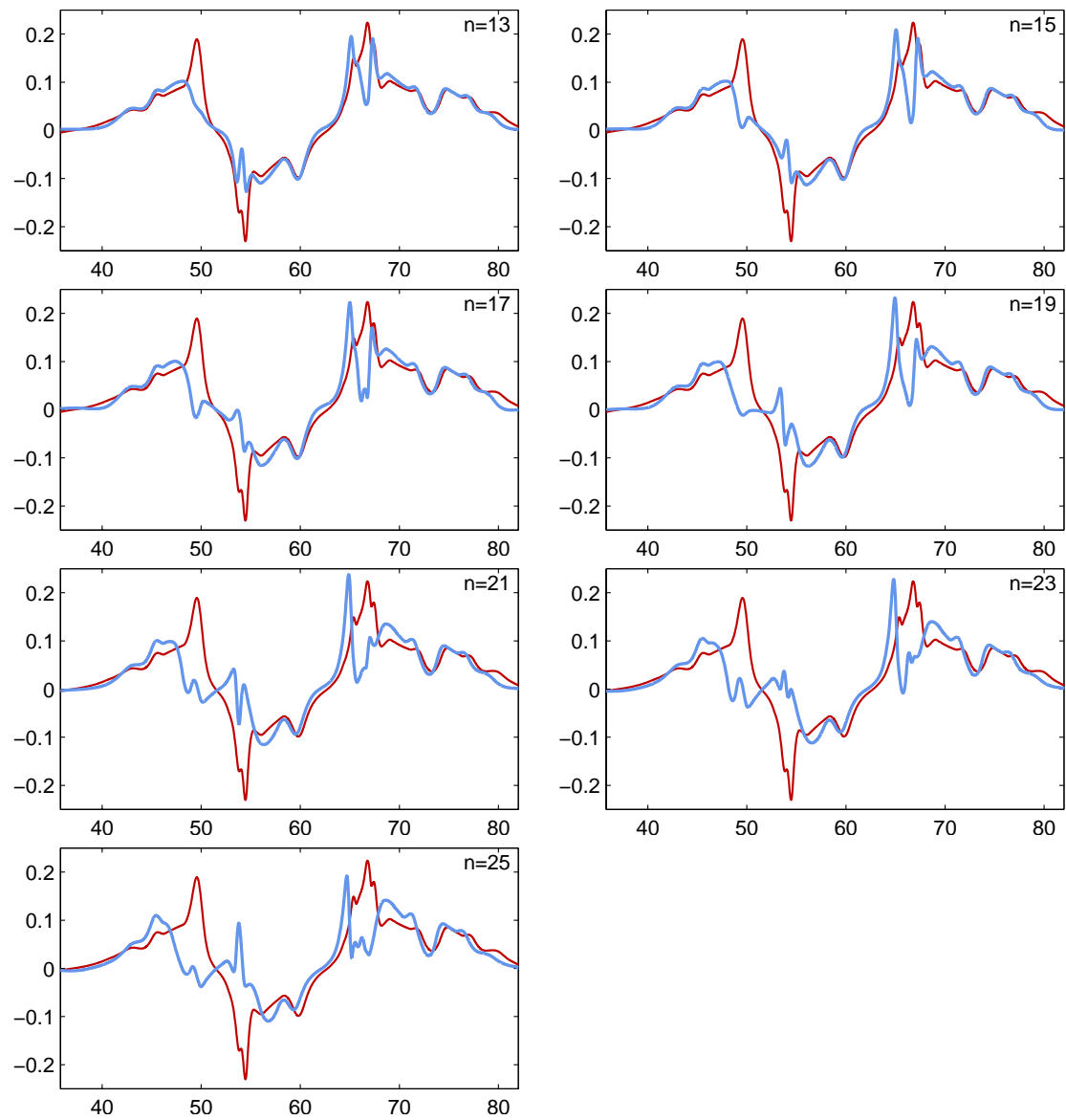
B.2. Krümmungsverlauf der Optimierung

B.2.1. Legende



B.2.2. Krümmungsverlauf





C Optimierungsverfahren nach Nelder-Mead

Für Optimierungsprobleme, bei denen die Zielfunktionen nicht überall differenzierbar sind oder die Berechnung der Ableitung sehr aufwendig ist, gibt es ableitungsfreie Optimierungsverfahren. Ein solches Verfahren stellt der Nelder-Mead Optimierungsalgorithmus dar.

Der Optimierungsansatz wird auch als Downhill-Simplex-Verfahren bezeichnet, da ein sogenannter Simplex als Grundstruktur verwendet wird. Im Unterschied zum Simplexverfahren für lineare Probleme nach Dantzig ist der Ansatz nach Nelder-Mead eine Methode zur Optimierung nichtlinearer Funktionen von mehreren Parametern. Die folgenden Ausführungen orientieren sich an (Alt, 2002; Lagarias et al., 1998).

Durch Vergleiche der Funktionswerte mehrerer Punkte im Parameterraum wird mit einer Schrittweitensteuerung der Gradient in Richtung des gesuchten Optimums angenähert, wobei es möglich ist, dass es sich dabei um ein lokales Minimum handelt. Das Verfahren konvergiert zwar im Vergleich zu Verfahren mit Ableitungen nicht besonders schnell, d.h. nur linear. Im Gegenzug ist der Ansatz aber dafür einfach und verhältnismäßig robust.

Das Verfahren findet das Optimum einer Funktion mit n Parametern einer Funktion im n -dimensionalen Parameterraum. Nach einem Grundlagen-Abschnitt erfolgt im Folgenden die Ausführung des Verfahrens.

C.1. Grundlagen

Betrachtet wird das Problem

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \tag{C.1}$$

mit der Zielfunktion $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

$x_0, \dots, x_n \in \mathbb{R}^n$ seien affin unabhängige Vektoren, d.h. die Vektoren $x_i - x_0, i = 1, \dots, n$ sind linear unabhängig. Die Menge

$$S = \left\{ \sum_{i=0}^n \lambda_i x_i \mid \lambda_i \geq 0, i = 0, \dots, n, \sum_{i=0}^n \lambda_i = 1 \right\} \quad (\text{C.2})$$

wird dann als n -dimensionales Simplex mit den Ecken x_0, \dots, x_n bezeichnet, d.h. es handelt sich um die konvexe Hülle der Punkte x_0, \dots, x_n .

Ausgehend von einem initialen Simplex¹ S_0 wird in jedem Iterationsschritt zum aktuellen Simplex S_k mit den Ecken x_0, \dots, x_n der Punkt x_m mit

$$f(x_m) = \max \{f(x_0), \dots, f(x_n)\} \quad (\text{C.3})$$

berechnet, der die Ecke von S_k mit dem größten Funktionswert darstellt. Es wird dann ein Punkt mit einem kleineren Funktionswert berechnet, der die Ecke x_m ersetzt, so dass das neue Simplex S_{k+1} ermittelt ist.

Zur Bestimmung dieses neuen Punkts gibt es drei verschiedene Konstruktionsprinzipien: Reflektion, Expansion und Kontraktion. Sei $S \subset \mathbb{R}^n$ ein Simplex mit den Ecken x_0, \dots, x_n , dann ist der Schwerpunkt der Ecken bzgl. $x_j, j = 0, \dots, n$:

$$s_j = \frac{1}{n} \sum_{i=0, i \neq j}^n x_i \quad (\text{C.4})$$

Bei der Reflektion wird als neuer Punkt $x_j = s_j + \gamma(s_j - x_j)$ berechnet, wobei γ die Reflektionskonstante mit $0 < \gamma \leq 1$ darstellt (Abbildung C.1).

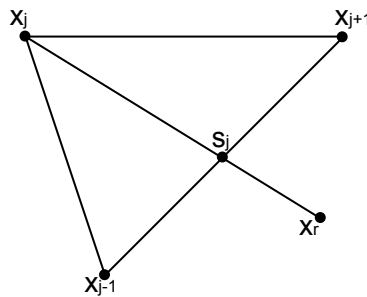
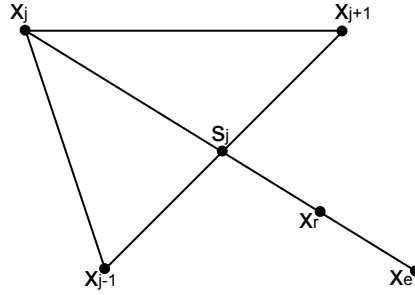


Abbildung C.1.: Reflektion mit $\gamma = \frac{1}{2}$

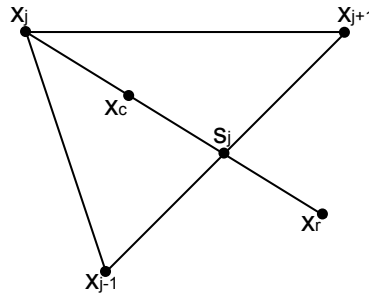
Bei einer Expansion wird der Punkt x_r weiter in Richtung $s_j - x_j$ bzw. $x_r - s_j$ verschoben. Als neuer Punkt ergibt sich $x_e = s_j + \beta(x_r - s_j)$ (Abbildung C.2), wobei β als die Expansionskonstante mit $\beta > 1$ benannt ist.

Die Kontraktion ist in drei Untertypen unterteilt:

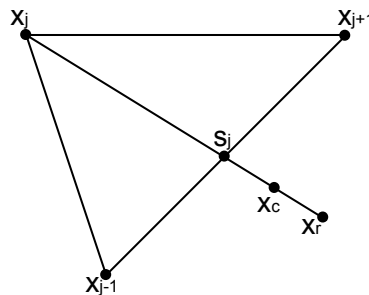
¹Als ein Simplex wird das einfachste aus $n + 1$ Punkten aufgespannte nicht leere Volumen im n -Dimensionalen Parameterraum bezeichnet.

Abbildung C.2.: Expansion mit $\beta = 2$

- Bei der partiellen Kontraktion „innen“ wird von x_j in Richtung $s_j - x_j$ bzw. $x_r - s_j$ verschoben. Der neue Punkt x_c berechnet sich entsprechend zu $x_c = s_j + \alpha(x_j - s_j)$ mit der Kontraktionskonstanten $0 < \alpha < 1$ (Abbildung C.3)

Abbildung C.3.: Kontraktion „innen“ mit $\alpha = \frac{1}{2}$

- Die partielle Kontraktion „außen“ bestimmt den Punkt x_c von x_r in Richtung $s_j - x_r$ bzw. $x_j - s_j$. x_c wird für die Kontraktionskonstanten $0 < \alpha < 1$ durch $x_c = s_j + \alpha(x_r - s_j)$ ermittelt (Abbildung C.4).

Abbildung C.4.: Kontraktion „außen“ mit $\alpha = \frac{1}{2}$

- Für die „totale“ Kontraktion bzgl. x_j werden die Punkte $x_i, i = 0, \dots, n, i \neq j$ durch die Punkte $\hat{x}_i = x_i + \frac{1}{2}(x_j - x_i) = \frac{1}{2}(x_i + x_j)$ ersetzt (Abbildung C.5).

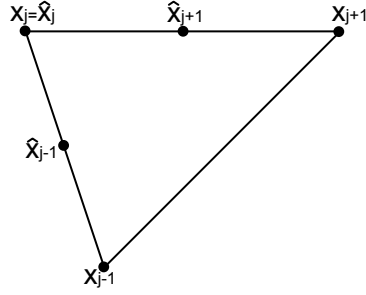


Abbildung C.5.: „Totale“ Kontraktion

C.2. Beschreibung des Verfahrens

Gegeben seien die Reflektionskonstante $0 < \gamma \leq 1$, die Expansionskonstante $\beta > 1$ und die Kontraktionskonstante $0 < \alpha < 1$, die nahezu universell wie folgt gewählt werden:

$$\alpha = \frac{1}{2}, \quad \beta = 2, \quad \gamma = 1 \quad (\text{C.5})$$

Das Verfahren besteht dann aus folgenden Schritten:

1. Es wird ein Startpunkt $x_{(0,0)} \in \mathbb{R}^n$ gewählt und die Ecken des initialen Simplexes S_0 durch

$$x_{(0,j)} = x_{(0,0)} + \vec{e}_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{C.6})$$

bestimmt, wobei $\vec{e}_j \in \mathbb{R}^n$ Einheitsvektoren sind. k wird zu null gesetzt.

2. Es werden der Punkt $x_{(k,m)}$ mit

$$f(x_{(k,m)}) = \max \left\{ f(x_{(k,0)}), \dots, f(x_{(k,n)}) \right\}, \quad (\text{C.7})$$

die Ecke von S_k mit dem größten Funktionswert, der Punkt $x_{(k,l)}$ mit

$$f(x_{(k,l)}) = \min \left\{ f(x_{(k,0)}), \dots, f(x_{(k,n)}) \right\}, \quad (\text{C.8})$$

die Ecke von S_k mit dem kleinsten Funktionswert und der Schwerpunkt der Ecken bzgl. $x_{(k,m)}$

$$s_{(k,m)} = \frac{1}{n} \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{(k,i)} \quad (\text{C.9})$$

bestimmt.

3. Es erfolgt eine Reflektion von $x_{(k,m)}$ am Schwerpunkt $s_{(k,m)}$, d.h. es wird

$$x_r = s_{(k,m)} + \gamma(s_{(k,m)} - x_{(k,m)}) \quad (\text{C.10})$$

berechnet, wobei erwartungsgemäß $f(x_r) < f(x_{(k,m)})$ gilt.

4. Es erfolgt eine Expansion mit der Reflektionskonstante γ , wenn x_r besser liegt als alle anderen Punkte des Simplex. Ist x_r zumindest verbessert im Vergleich zu irgendeinem Punkt des Simplex, so wird dieser Punkt durch x_r ersetzt und der Algorithmus von vorn begonnen. Bringt der neue Punkt eine Verschlechterung, erfolgt eine Kontraktion, indem der schlechteste Punkt des Simplex um die Kontraktionskonstante α an den besten Punkt heranrückt. Bewirkt auch dieser neue Punkt eine Verschlechterung, wird der Punkt verworfen und stattdessen der ganze Simplex mit α um den aktuell besten Punkt komprimiert.

Auf Basis der dargestellten Regeln wird die Iteration so lange vorgenommen, bis das Konvergenzkriterium erfüllt ist. Das Simplex wird sich schrittweise an das Optimum annähern und um dieses herum zusammenziehen.

D Ausgewählte Publikationen

Im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Braunschweig sind folgende Publikationen entstanden:

WILLE, J.M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Comprehensive Treated Sections in a Trajectory Planner for Realizing Autonomous Driving in Braunschweig's Urban Traffic. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Madeira, Portugal, 2010, S. 647–652.

SAUST, F.; BLEY, O.; KUTZNER, R.; WILLE, J.M.; FRIEDRICH, B.; MAURER, M.: Exploitability of vehicle related sensor data in cooperative systems. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Madeira, Portugal, 2010, S. 1724–1729.

WILLE, J.M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Smooth Autonomous Driving on Braunschweig's Inner Ring Road. In: *11. International Conference on Intelligent Autonomous Systems*. Ottawa, Kanada, 2010, S. 227–236.

WILLE, J.M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Stadtpilot: Driving Autonomously on Braunschweig's Inner Ring Road. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*. San Diego, USA, 2010, S. 506–511.

WILLE, J.M.; NOTHDURFT, T.; SAUST, F.; HECKER, P.; MAURER, M.: Projektthaus Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *26. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*. Wolfsburg, 2010, S. 139–152.

WILLE, J.M.; NOTHDURFT, T.; SAUST, F.; HECKER, P.; MAURER, M.: Projektthaus Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *19. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen, 2010, S. 829–845.

WILLE, J.M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Segmentübergreifende Bahnplanung mittels eines analytischen Optimierungsverfahrens für die autonome Fahrzeugführung

auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *6. Workshop Fahrerassistenzsysteme - FAS 2009*. Löwenstein, 2009, S. 97–105.

WILLE, J.M.; MATTHAEI, R.; OHL, S.; SAUST, F.; MAURER, M.; SCHUMACHER, W.; HOMEIER, K.; NOTHDURFT, T.; SASSE, A.; HECKER, P.; WOLF, L.: Der Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2009, S. 27–48.

SAUST, F.; MÜLLER, T.; WILLE, J.M.; MAURER, M.: Entwicklungsbegleitendes Simulations- und Testkonzept für autonome Fahrzeuge in städtischen Umgebungen. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2009, S. 87–107.

WILLE, J.M.: Der Stadtpilot - Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *CeBIT-2009-Forum „CeBIT in Motion“*, 2009.

WILLE, J.M.; MAURER, M.: Ein analytisches Optimierungsverfahren zur segmentübergreifenden Bahnplanung für die autonome Fahrzeugführung in einer städtischen Umgebung. In: *43. Regelungstechnisches Kolloquium*. Boppard, 2009.

WILLE, J.M.; HOMEIER, K.; KLOSE, F.; NOTHDURFT, T.; HECKER, P.; MAURER, M.; SCHUMACHER, W.; WOLF, L.: Caroline - An Autonomous Vehicle for Urban Environments. In: *Presentation in IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*. Eindhoven, Netherlands, 2008.

WILLE, J.M.; FORM, T.: Realizing complex autonomous driving maneuvers the approach taken by team CarOLO at the DARPA urban challenge. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. Columbus, OH, 2008, S. 232–236.

WILLE, J.M.; FORM, T.: Low Level Control in a Modular System Architecture for Realizing Precise Driving Maneuvers of the Autonomous Vehicle Caroline. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Beijing, 2008, S. 705–710.

RAUSKOLB, F. W.; BERGER, K.; LIPSKI, C.; MAGNOR, M.; CORNELSEN, K.; EFFERTZ, J.; FORM, T.; GRAEFE, F.; OHL, S.; SCHUMACHER, W.; WILLE,

J.M.; HECKER, P.; NOTHDURFT, T.; DOERING, M.; HOMEIER, K.; MORGENROTH, J.; WOLF, L.; BASARKE, C.; BERGER, C.; GÜLKE, T.; KLOSE, F.; RUMPE, B.: Caroline: An Autonomously Driving Vehicle for Urban Environments. In: *The DARPA Urban Challenge - Autonomous Vehicles in City Traffic*. Springer Tracts in Advanced Robotics, Bd. 56/2009, Springer Berlin / Heidelberg, 2009, S. 441–508.

RAUSKOLB, F. W.; BERGER, K.; LIPSKI, C.; MAGNOR, M.; CORNELSEN, K.; EFFERTZ, J.; FORM, T.; GRAEFE, F.; OHL, S.; SCHUMACHER, W.; WILLE, J.M.; HECKER, P.; NOTHDURFT, T.; DOERING, M.; HOMEIER, K.; MORGENROTH, J.; WOLF, L.; BASARKE, C.; BERGER, C.; GÜLKE, T.; KLOSE, F.; RUMPE, B.: Caroline: An Autonomously Driving Vehicle for Urban Environments. In: *Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part II*. Journal of Field Robotics, 2008, Volume 25, Issue 9, S. 674–724.

HOMEIER, K.; WILLE, J.M.: The Autonomous Vehicle Caroline - A Technical Overview. In: *The 10th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Urban Challenge Workshop*, Baden-Baden, 2008.

FORM, T.; EFFERTZ, J.; OHL, S.; WILLE, J.M.: Urban Challenge 2007, Lessons learned - Team CarOLO. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2008.

FORM, T.; BERGER, C.; CORNELSEN, C.; DOERING, M.; EFFERTZ, J.; GÜLKE, T.; HOMEIER, K.; MOVSHYN, A.; NOTHDURFT, T.; SACHSE, M.; WILLE, J.M.: Caroline – Ein autonom fahrendes Fahrzeug im Stadtverkehr. In: *Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*. Braunschweig, 2007, 121-140.

BASARKE, C.; BERGER, C.; CORNELSEN, K.; DOERING, M.; EFFERTZ, J.; HOMEIER, K.; LIPSKI, C.; NOTHDURFT, T.; WILLE, J.M.: DARPA Urban Challenge 2007 - Team CarOLO. In: *DARPA Urban Challenge Semifinalist Technical Paper*, 2007.

Tabellenverzeichnis

3.1	Rahmendaten und Kursverlauf des ersten Abschnitts.	36
3.2	Rahmendaten und Kursverlauf des zweiten Abschnitts	38
3.3	Rahmendaten und Kursverlauf des dritten Abschnitts	39
3.4	Rahmendaten und Kursverlauf des vierten Abschnitts	39
4.1	Statistische Daten des Szenarios	47
4.2	Gegenüberstellung der Rahmenbedingungen von DARPA Urban Chal- lenge 2007 und dem Forschungsvorhaben Stadtpilot	59
4.3	Ein Vergleich aktueller Vorhaben mit den Aktivitäten rund um den Versuchsträger VaMP	62
5.1	Ergebnisse der Zählung der von den Verkehrsteilnehmern durchge- führten Fahrmanöver	64
7.1	Gegenüberstellung der Urban-Challenge- und Stadtpilot-Testträger an der Technischen Universität Braunschweig	100
8.1	Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Parametri- sierung der manöverübergreifenden Trajektorienplanung	124
9.1	Bewertungskriterien zur Evaluation	137
9.2	Direkt zur Bewertung verwendete Simulationsergebnisse	137
9.3	Abgeleitete Beurteilungsmaße der Simulationsergebnisse	138
9.4	Auswertung der Simulationsergebnisse	139
9.5	Direkte Messgrößen der Fahrversuche	142
9.6	Abgeleitete Beurteilungsmaße aus den Fahrversuchen	142
9.7	Auswertung der Fahrversuche	143
10.1	Übersicht der Testfahrten bei Tageslicht	149
10.2	Übersicht der Testfahrten bei Dunkelheit	149
10.3	Übersicht über die Häufigkeit der möglichen Reaktionen des Fahr- zeugs bei Zufahrt auf Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen während der neun Testfahrten	150

Abbildungsverzeichnis

2.1	Versuchsfahrzeuge VaMoRs, VaMP und MuCAR-3 der Universität der Bundeswehr München	12
2.2	Versuchsfahrzeug DARVIN des Fraunhofer IITB in Karlsruhe . . .	15
2.3	Forschungsfahrzeug MUCCI und Testträger des Teams AnnieWay in der DARPA Urban Challenge	16
2.4	Versuchsfahrzeuge Klaus im Projekt Autonomes Fahren und Caroline in der DARPA Urban Challenge der Technischen Universität Braunschweig	17
2.5	Forschungsfahrzeuge MobLab, ARGO und TerraMax T2 des VisLab in Parma, Italien	19
2.6	Testträger Boss, NavLab 5 und NavLab 11 der Carnegie Mellon University in Pittsburgh	20
2.7	Stanfords fahrerlose Fahrzeuge für die DARPA Grand Challenge 2005 und die Urban Challenge 2007: Stanley und Junior	21
2.8	Carnegie Mellons Testträger Highlander bei der Durchquerung des sogenannten Beer Bottle Pass in der zweiten Grand Challenge . . .	25
2.9	Impressionen aus der Urban Challenge	26
3.1	Zeitplan zur Entwicklung von Caroline	34
3.2	Szenen aus den drei verschiedenen Kursen des National Qualification Events: Kurse A, B und C	35
3.3	Verfügbares Straßennetz im Finale.	36
3.4	Szenen aus dem Finale.	37
3.5	Wettbewerbsende	40
4.1	Typische Verkehrsszenen des Braunschweiger Stadtrings	45
4.2	Karte des Braunschweiger Stadtgebiets und ausgewählter Abschnitt für die erste autonome Fahrt	46
4.3	Besondere Situationen des Auftaktszenarios	48
4.4	Eindrücke aus der Urban Challenge zur Verdeutlichung der Rahmenbedingungen	52
4.5	Infrastruktur in der Urban Challenge und auf dem Stadtring . . .	54

4.6	Typische Satellitensichtbarkeit bei einer Messfahrt auf dem östlichen Braunschweiger Stadtring	55
4.7	Beispielszenen vom Stadtring, die die erforderliche Präzision verdeutlichen	55
4.8	Umfeld in der Urban Challenge und auf dem Stadtring	57
4.9	Beispiele für erlaubte Fahrzeugmodifikationen in der Urban Challenge	58
5.1	Vergleich der Häufigkeit an Fahrmanövern auf Autobahnen im Vergleich zur Häufigkeit im Stadtverkehr	64
5.2	Situationsspezifischer Anteil regel- oder verhaltensbasierter Entscheidungsfindung an der Fahrzeugführung	67
5.3	Luftaufnahme des Braunschweiger Stadtrings an der Kreuzung von Rebenring und Pockelsstraße	68
5.4	Abbildung einer Verkehrsszene des Braunschweiger Stadtrings durch ein im System hinterlegtes Regelwerk	68
5.5	Verhaltensbasierte Auflösung der abgewandelten Situation	70
5.6	Situationsgetriebenes Ansteuern unterschiedlicher Steuereinheiten über einen Zustandsautomaten	71
5.7	Manöverselektive Planung von Trajektorien	72
5.8	Manöverübergreifende Planung von Trajektorien	72
5.9	Visualisierung der Belegungskarte und Kamerabild bei einem nachgestellten Stauende mit Ausweichmöglichkeit in strukturierter Umgebung	75
6.1	Systemgrößen und Parameter des linearen Einspurmodells, Koordinatensysteme nach DIN 70000 (DIN-70000, 1994)	80
6.2	Einfluss des Glättungsfaktors p auf den Verlauf eines Smoothing Splines	88
6.3	Exemplarischer Lenkwinkel- und Trajektorienverlauf bei Darstellung eines Abbiegemanövers durch eine Sigmoidfunktion	90
6.4	Lenkwinkelverlauf bei Darstellung eines Fahrstreifenwechsels durch einen Quintic G^2 -Spline	91
7.1	Versuchsträger Caroline aus der Urban Challenge und Versuchsträger Leonie aus dem Projekt Stadtpilot	94
7.2	Linearaktuator in Caroline und Direktschaltgetriebe in Leonie zur Wahl der Getriebeposition	95
7.3	Verbau der Ibeo Alasca XT Laserscanner an Caroline und Leonie .	95

7.4	Verbauposition eines Hella IDIS und eines SMS UMRR Radarsensors an Caroline und Leonie, an Leonie zusätzlich durch einen Hella IDIS 2.0 Sensor ergänzt	96
7.5	System zur Fahrbereichserkennung an Caroline, Sick-Scanner und Velodyne Laserscanner HDL64-Series 2 an Leonie	97
7.6	Erfassungsbereiche der an Leonie verbauten Sensoren	97
7.7	Rechnersysteme und Steuergeräte: Caroline, Leonie	99
7.8	Funktionale Systemarchitektur für autonome Straßenfahrzeuge in städtischen Szenarien	102
7.9	Datenstruktur zur Abbildung von Fahrentscheidungen	105
7.10	Mehrstufiges Konzept zur Fahrzeugführung	106
7.11	Abbildung einer Folgefahrt	107
7.12	Fahrstreifenwechsel	108
8.1	Einführung eines Toleranzbandes zur Beeinflussung des Optimierungsgrades	113
8.2	Planungsalgorithmus bestehend aus drei Stufen	114
8.3	Visualisierung der Grundidee: Ziel sind Trajektorien, die zu Beginn einer Kurve an der Außenseite entlang laufen und sich am Scheitelpunkt der Innenseite annähern.	115
8.4	Typisierung von Stützstellen	117
8.5	Bestimmung der Verschiebungsvektoren in Abhängigkeit des Stützstellentyps	118
8.6	Aufbau eines Elastischen Bandes innerhalb des ermittelten Fahrkorridors	120
8.7	Typisches Fahrvorhaben auf dem Braunschweiger Stadtring bestehend aus Folgefahrt, Fahrstreifenwechsel und Abbiegevorgang	124
8.8	Darstellung des für die Optimierung zur Verfügung stehenden Korridors	125
8.9	Optimierungszwischenergebnis nach Anwendung des Typisierungsverfahrens und Erreichens der Gleichgewichtslage durch das Elastische Band	126
8.10	Optimierungsendergebnis nach Anwendung des Smoothing Splines in der κ -s-Ebene	127
8.11	Vergleich mit einer Referenztrajektorie, berechnet mit dem Downhill-Simplex-Verfahren nach Nelder und Mead	128
8.12	Mögliche Anwendung der manöverübergreifenden Trajektorienoptimierung in einem Fahrerassistenzsystem zur automatischen Gefahrenbremsung	128

8.13	Ergebnis der Geschwindigkeitsplanung auf Basis der Vorgaben des Fahrentscheidermoduls	129
8.14	Aufbau der Längsregelung	130
8.15	Aufbau der Querregelung	131
9.1	Virtueller Testkurs für die simulierten Fahrversuche	133
9.2	Krümmungsverlauf der manöverübergreifenden Trajektorie für den Simulationskurs	134
9.3	Krümmungsverlauf der Trajektorie bei Planung mit Fahrmanövern, die durch Sigmoiden dargestellt werden	135
9.4	Krümmungsverlauf der Trajektorie bei Planung mit Fahrmanövern, die durch Splines dargestellt werden.	135
9.5	Vergleich der Krümmungsverläufe der unterschiedlichen Planungsverfahren bei einem Fahrstreifenwechsel	136
9.6	Testkurs für die Fahrversuche mit dem Testträger Leonie	139
9.7	Krümmungsverlauf der Trajektorie und Geschwindigkeitsvorgaben des Fahrentscheiders für den realen Fahrversuch auf dem Testgelände, geplant mit der manöverübergreifenden Trajektorienplanung.	140
9.8	Ausschnitt aus dem kommandierten Lenkwinkelverlauf beim Abfahren der Mittellinie; die hohen geforderten Lenkwinkeländerungen führen zum automatischen Abschalten des autonomen Fahrbetriebs durch die Module zur Überwachung einer autonomen Fahrt	141
10.1	Reproduzierung einer Szene mit plötzlichem Einscherer auf dem Testgelände	147
10.2	Test der Nothaltefähigkeiten des Versuchsträgers auf dem Testgelände	147
10.3	Versuchsfahrzeug Leonie bei einer Testfahrt auf dem Braunschweiger Stadtring	148
10.4	Übersicht der bei Tageslicht durchgeführten Testfahrten T1–T6	151
10.5	Übersicht der bei Dunkelheit durchgeführten Testfahrten D1–D3	152
10.6	Darstellung des Längsführungsmodus, der Phase der Lichtsignalanlage, des Fahrmodus und des Geschwindigkeitsprofils der Testfahrt T1	152
10.7	Anfahrt auf eine Lichtsignalanlage mit bereits wartenden Verkehrsteilnehmern	153
10.8	Kameraaufnahmen aus Leonie bei Anfahrt auf eine Lichtsignalanlage mit wartendem Verkehr	154
10.9	Gesamtdarstellung von Testfahrt T3	154
10.10	Passieren eines Lastkraftwagens	155

10.11	Aufzeichnungen der Eigengeschwindigkeit und des Längsführungsmodus bei Vorbeifahrt an einem Lastkraftwagen	156
10.12	Einschervorgang eines Verkehrsteilnehmers ohne ausreichenden Sicherheitsabstand	156
10.13	Messdaten bei einer Szene mit sehr kurzfristigem Einscherer	156
10.14	Gesamtdarstellung der Testfahrt D1 bei Dunkelheit	157
10.15	Kameraaufnahmen bei einer Testfahrt bei Dunkelheit: Der blaue Kreis markiert einen Verkehrsteilnehmer, der einen Einschervorgang auf Leonies Fahrstreifen vornimmt.	157
10.16	Messdaten eines Einschervorgangs bei einer Testfahrt bei Dunkelheit	158
10.17	Histogramm der Querablage bei der Testfahrt D1: Der Mittelwert beträgt -0,0234 m, die Standardabweichung 0,0655 m.	158
C.1	Reflektion mit $\gamma = \frac{1}{2}$	173
C.2	Expansion mit $\beta = 2$	174
C.3	Kontraktion „innen“ mit $\alpha = \frac{1}{2}$	174
C.4	Kontraktion „außen“ mit $\alpha = \frac{1}{2}$	174
C.5	„Totale“ Kontraktion	175

Literatur

- [Ablassmeier 2009] ABLASSMEIER, M.: *Multimodales, kontextadaptives Informationsmanagement im Automobil*, Technische Universität München, Diss., 2009.
- [AHS 2011] *Advanced Cruise-Assist Highway Systems*. Version: 07. August 2011. <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/1998HBook/chapter3/3-3e.html>. Webseite.
- [Albus 1993] ALBUS, J. S.: A Reference Model Architecture for Intelligent Systems Design. In: ANTSAKLIS, P. J. (Hrsg.); PASSINO, K. M. (Hrsg.): *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers Norwell, 1993, S. 27–56.
- [Alt 2002] ALT, W.: *Nichtlineare Optimierung*. Vieweg Verlag, 2002.
- [Ansorge u. Oberle 2010] ANSORGE, R.; OBERLE, H. J.: *Mathematik für Ingenieure: Band 1: Lineare Algebra und analytische Geometrie, Differential- und Integralrechnung einer Variablen*. John Wiley & Sons, 2010.
- [Antsaklis u. Passino 1993] ANTSAKLIS, P. J.; PASSINO, K. M.: Introduction to Intelligent Control Systems with High Degrees of Autonomy. In: ANTSAKLIS, P. J. (Hrsg.); PASSINO, K. M. (Hrsg.): *An Introduction to Intelligent and Autonomous Control*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers Norwell, 1993, S. 1–26.
- [Argo 2009] *The Argo Project*. Version: 28. Dezember 2009. <http://www.argo.ce.unipr.it/argo/english/index.html>. Webseite.
- [Arkin 1998] ARKIN, R.C.: *Behavior-Based Robotics*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998.
- [BASt 2009] BAST: Jahresbericht / Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). 2009/2010. – Allgemeines Heft A 34.
- [Becker u. Simon 2000] BECKER, J.C.; SIMON, A.: Sensor and Navigation Data Fusion for an Autonomous Vehicle. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Dearborn, MI, 2000, S. 156–161.

- [Behringer u. Müller 1998] BEHRINGER, R.; MÜLLER, N.: Autonomous Road Vehicle Guidance from Autobahnen to Narrow Curves. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14 (1998), Nr. 5, S. 810–815.
- [Bengler 2010] BENGLER, K.: *Produktergonomie, Skriptum zur Vorlesung*. Technische Universität München, 2010.
- [Berglund et al. 2001] BERGLUND, T.; ERIKSON, U.; JONSSON, H.; MROZEK, K.; SÖDERKVIST, I.: Automatic Generation of Smooth Paths Bounded by Polygonal Chains. In: *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation*. Las Vegas, NV, 2001, S. 528–535.
- [Bergmiller u. Maurer 2011] BERGMILLER, P.; MAURER, M.: Flexible Versuchsträger als Testplattform für Antriebskonzepte in Elektrofahrzeugen. In: *Trends in der elektrischen Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. München, 2011.
- [Boehlau et al. 2009] BOEHLAU, C.; LICHTÉ, B.; OTTENHUES, T.: New Concept of a Compact Lidar Scanner for ACC and Safety Applications. In: *SAE World Congress & Exhibition*. Detroit, MI, 2009.
- [de Boor 2001] BOOR, C. de: *A Practical Guide to Splines*. Springer Berlin / Heidelberg, 2001.
- [Brüdigam 1994] BRÜDIGAM, C.: *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1994.
- [Börner 2006] BÖRNER, M.: Modellierung, Analyse und Simulation der Fahrzeugquerdynamik. In: *Fahrdynamik-Regelungen*. Vieweg & Sohn Verlag, 2006, S. 47–70.
- [Brockhaus 1973] BROCKHAUS: *Enzyklopädie in 6 Bänden, Der neue Brockhaus, Band 1*. F.A. Brockhaus Wiesbaden, 1973.
- [Broggi et al. 1999] BROGGI, A.; BERTOZZI, M.; FASCIOLI, A.; CONTE, G.: *Automatic Vehicle Guidance: The Experience of the ARGO Autonomous Vehicle*. World Scientific Publishing Company, 1999.
- [Brooks 1986] BROOKS, R.: A Robust Layered Control Systems for a Mobile Robot. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation* 2 (1986), Nr. 1, S. 14–23.

- [Budach 2010] BUDACH, N.: *Entwicklung und Evaluation einer robusten, laserbasierten Detektion von Fahrspurmarkierungen zur Stützung der Fahrzeugortung*, Technische Universität Braunschweig, Bachelorarbeit, 2010.
- [California PATH 2011] *California PATH*. Version: 06. August 2011. <http://www.path.berkeley.edu/>. Webseite.
- [Cernat 2010] CERNAT, H.: *Evaluierung der segmentübergreifenden Trajektorienplanung für das autonome Straßenfahrzeug Leonie*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2010.
- [CMU 2009] *Carnegie Mellon, School of Computer Science, Photo Archive*. Version: 28. Dezember 2009. http://www.cs.cmu.edu/photopages/2007/07robot_hof.html. Webseite.
- [Cremer et al. 1994] CREMER, J.; KEARNEY, J.; PAPELIS, Y.; ROMANO, R.: The Software Architecture for Scenario Control in the Iowa Driving Simulator. In: *4th Computer Generated Forces and Behavioral Representation*. Orlando, FL, 1994.
- [Darpa 2005] DARPA: *Darpa Grand Challenge*. 2005.
- [Darpa 2009a] DARPA: *Darpa Urban Challenge*. 2009.
- [Darpa 2009b] *Darpa Urban Challenge Rules*. Version: 28. Dezember 2009. <http://www.darpa.mil/grandchallenge/rules.asp>. Webseite.
- [Darpa 2009c] *Darpa Urban Challenge Technical Evaluation Criteria*. Version: 28. Dezember 2009. <http://www.darpa.mil/grandchallenge/rules.asp>. Webseite.
- [Dickmanns 2002] DICKMANNS, E. D.: Vision for Ground Vehicles: History and Prospects. In: *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* (2002), S. 1–44.
- [Dickmanns et al. 1994] DICKMANNS, E. D.; BEHRINGER, R.; DICKMANNS, D.; HILDE-BRANDT, T.; MAURER, M.; THOMANEK, F.; SCHIELEN, J.: The seeing passenger car “VaMoRs-P”. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Paris, 1994, S. 68–73.
- [Dickmanns 1987] DICKMANNS, E.D.: 4D-Szenenanalyse mit integralen raum-/zeitlichen Modellen. In: *DAGM-Symposium*. Braunschweig, 1987, S. 257–271.

- [Dickmanns 1994] DICKMANNS, E.D.: The 4D-Approach to Dynamic Machine Vision. In: *Conference on Decision and Control*. Lake Buena Vista, FL, 1994, S. 3770–3775.
- [Dickmanns 2007] DICKMANNS, E.D.: *Dynamic Vision for Perception and Control of Motion* Dickmanns. Springer Berlin, Heidelberg, 2007.
- [DIN-70000 1994] DIN-70000: *Straßenfahrzeuge - Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten*. Januar 1994.
- [Donges 2009] DONGES, E.: Fahrerverhaltensmodelle. In: WINNER, H. (Hrsg.); HAKULI, S. (Hrsg.); WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2009, S. 15–23.
- [Donges u. Naab 1996] DONGES, E.; NAAB, K.: Regelsysteme zur Fahrzeugführung und Stabilisierung in der Automobiltechnik. In: *at - Automatisierungstechnik* Bd. 44, 1996, S. 226–236.
- [Duden 2006] DUDEN: *Band 1: Die Deutsche Rechtschreibung*. Bd. 24. Duden-Verlag, 2006.
- [Durrant-Whyte u. Bailey 2006] DURRANT-WHYTE, H.; BAILEY, T.: Simultaneous Localisation and Mapping: Part I. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 13 (2006), June, Nr. 2, S. 99–110.
- [Effertz 2009] EFFERTZ, J.: *Autonome Fahrzeugführung in urbaner Umgebung durch Kombination objekt- und kartenbasierter Umfeldmodelle*. Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2009.
- [Enkelmann 2001] ENKELMANN, W.: Video-Based Driver Assistance - From Basic Functions to Applications. In: *International Journal of Computer Vision* 45 (2001), S. 201–221.
- [Erke 1993] ERKE, H.: Vorgaben an die Verkehrsplanung. Anforderung an den Menschen aus Sicht der ökologischen Psychologie. In: LANG, E. (Hrsg.); ARNOLD, K. (Hrsg.): *Der Mensch im Straßenverkehr*. Stuttgart: Ferdinand-Enke-Verlag, 1993, S. 99–112.
- [Föllinger 1994] FÖLLINGER, O.: *Optimale Regelung und Steuerung*. Oldenbourg, 1994.

- [Fraichard u. Scheuer 2004] FRAICHARD, T.; SCHEUER, A.: From Reeds and Shepp's to Continuous-Curvature Paths. In: *IEEE Transactions on Robotics* 20 (2004), Nr. 6, S. 1025–1035.
- [Franke et al. 1994] FRANKE, U.; MEHRING, S.; SUISSA, A.; HAHN, S.: The Daimler-Benz Steering Assistant – a Spin-off from Autonomous Driving. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Paris, 1994, S. 120–124.
- [Gasser 2009] GASSER, T.M.: Rechtliche Aspekte einer Veränderung der Fahraufgabe durch zunehmende Automatisierung im Straßenverkehr. In: *10. Braunschweiger Symposium AAET*, 2009, S. 50–58.
- [Gasser 2010] GASSER, T.M.: Die „Projektgruppe Automatisierung“: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In: *11. Braunschweiger Symposium AAET*, 2010, S. 170–179.
- [Gehrig u. Stein 1998] GEHRIG, S.K.; STEIN, F.J.: A Trajectory-Based Approach for the Lateral Control of Car Following Systems. In: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* Bd. 4. San Diego, CA, 1998, S. 3596–3601.
- [Gillan 1989] GILLAN, W.J.: PROMETHEUS and DRIVE: their implications for traffic managers. In: *Vehicle Navigation and Information Systems Conference*. Toronto, 1989, Version von 2002, S. 237–243.
- [Goebel 2009] GOEBL, M.: *Eine realzeitfähige Architektur zur Integration kognitiver Funktionen*. Technische Universität München, Dissertation, 2009.
- [Goebel et al. 2008a] GOEBL, M.; ALTHOFF, M.; BUSS, M.; FÄRBER, G.; HECKER, F.; HEISSING, B.; KRAUS, S.; NAGEL, R.; PUENTE LEON, F.; RATTEI, F.; RUSS, M.; SCHWEITZER, M.; THUY, M.; WANG, C.; WUENSCH, H. J.: Design and Capabilities of the Munich Cognitive Automobile. In: *Posterpresentation of IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Eindhoven, 2008.
- [Goebel et al. 2008b] GOEBL, M.; ALTHOFF, M.; BUSS, M.; FÄRBER, G.; HECKER, F.; HEISSING, B.; KRAUS, S.; NAGEL, R.; PUENTE LEON, F.; RATTEI, F.; RUSS, M.; SCHWEITZER, M.; THUY, M.; WANG, C.; WUENSCH, H. J.: Design and Capabilities of the Munich Cognitive Automobile. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Eindhoven, 2008, S. 1101–1107.
- [Guarino Lo Bianco u. Piazzzi 2000] GUARINO LO BIANCO, C.; PIAZZI, A.: Optimal Trajectory Planning with Quintic G^2 -Splines. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Dearborn, MI, 2000, S. 620–625.

- [Guarino Lo Bianco u. Piazzzi 2001] GUARINO LO BIANCO, C.; PIAZZI, A.: A Hybrid Algorithm for Infinitely Constrained Optimization. In: *International Journal of System Science* 32 (2001), Nr. 1, S. 91–102.
- [Hattori et al. 1992] HATTORI, A.; HOSAKA, A.; TANIGUCHI, M.: Driving Control System for an Autonomous Vehicle Using Multiple Observed Point Information. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Detroit, MI, 1992, S. 207–212.
- [Heck 2009] HECK, P.: *Entwicklung erster Funktionalitäten des Fahrentscheidermoduls für das autonome Straßenfahrzeug Leonie*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2009.
- [Heißing 2007] HEISSING, B.; ERSOY, M. (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch*. Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- [Herczeg 2005] HERCZEG, Michael: *Software-Ergonomie*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005.
- [Hoschek u. Lasser 1992] HOSCHEK, J.; LASSER, D.: *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. B.G. Teubner Verlag, 1992.
- [Hundelshausen et al. 2009] HUNDELSHAUSEN, F.v.; HIMMELSBACH, M.; HECKER, F.; MUELLER, A.; WUENSCH, H.-J.: Driving with Tentacles - Integral Structures for Sensing and Motion. In: *The DARPA Urban Challenge* Bd. 56/2009. Springer Berlin, Heidelberg, 2009, Kapitel Driving with Tentacles - Integral Structures for Sensing and Motion, S. 393–440.
- [IITB 2009] *Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung, Darwin Projektbeschreibung*. Version: 28. Dezember 2009. <http://i21www.ira.uka.de/darwin/>. Webseite.
- [Inland Transport Committee 1968] INLAND TRANSPORT COMMITTEE: *Convention on Road Traffic*. Wien: United Nations Economic Commission For Europe, 1968.
- [IV 2007] *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Istanbul, 2007.
- [IV 2008] *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Eindhoven, 2008.
- [IV 2009] *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Shanghai, 2009.
- [IV 2010] *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. San Diego, CA, 2010.

- [Jablonski et al. 2008] JABLONSKI, T.; SCHUMANN, H.; BUSSE, C.; HAUSSMANN, H.; HALLMANN, U.; DREYER, D.; SCHÖTTLER, F.: Die neue elektromechanische Lenkung APABS. In: *Automobiltechnische Zeitschrift, ATZelextronik* 01 (2008).
- [JFR 2008a] *Journal of Field Robotics - Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part I.* 2008.
- [JFR 2008b] *Journal of Field Robotics - Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part II.* 2008.
- [JFR 2008c] *Journal of Field Robotics - Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part III.* 2008.
- [Jochem et al. 1995] JOCHEM, T.; POMERLEAU, D.; KUMAR, B.; ARMSTRONG, J.: PANS: a portable navigation platform. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Detroit, MI, 1995, S. 107–112.
- [Kognimobil 2009] *Transregional Collaborative Research Center 28, Cognitive Automobiles*. Version: 28. Dezember 2009. <http://www.kognimobil.org/index.php>. Webseite.
- [Koline 2010] *Webseite des Forschungsprojekts Koline*. Version: 21. Dezember 2010. <http://www.projekt-koline.de>. Webseite.
- [Kolossa 2010] KOLOSSA, A.: *Längsregelung eines autonomen Straßenfahrzeugs in städtischer Umgebung*, Technische Universität Braunschweig, Studienarbeit, 2010.
- [Kubota et al. 1999] KUBOTA, K.; YAMAGUCHI, K.; MASHIMO, H.: A Study of System Architecture for the Advanced Cruise-Assist Highway System (AHS). In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Tokyo, 1999, S. 335–341.
- [Labenski 2009] LABENSKI, V.: *Identifikation von Gütemaßen in der Querführung eines autonomen Straßenfahrzeugs*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2009.
- [Lagarias et al. 1998] LAGARIAS, J. C.; REEDS, J. A.; WRIGHT, M. H.; WRIGHT, P. E.: Convergence Properties of the Nelder–Mead Simplex Method in Low Dimensions. In: *SIAM Journal on Optimization* 9 (1998), Nr. 1, S. 112–147.
- [Lammen 1993] LAMMEN, B.: *Automatische Kollisionsvermeidung von Kraftfahrzeugen*. Universität Dortmund, Dissertation, 1993.

- [Luckhardt u. Niehoff 1995] LUCKHARDT, J. (Hrsg.); NIEHOFF, F. (Hrsg.): *Heinrich der Löwe und seine Zeit, Herrschaft und Repräsentation der Welfen 1125-1235*. Bd. 1-3. Hirner Verlag München, 1995.
- [Maurer 2000] MAURER, M.: *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Bd. 443. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Dissertation, 2000.
- [Maurer 2010] MAURER, M.: *Fahrerassistenz mit maschineller Wahrnehmung, Skriptum zur Vorlesung*. Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [Maurer et al. 1996] MAURER, M.; BEHRINGER, R.; FÜRST, S.; THOMANEK, F.; DICKMANN, E. D.: A Compact Vision System for Road Vehicle Guidance. In: *IEEE Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition* Bd. 3. Wien, 1996, S. 313–317.
- [Mitschke 2005] MITSCHKE, M.: Das Einspurmodell von Riekert-Schunck. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 11 (2005).
- [Mitschke u. Wallentowitz 2004] MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Verlag, 2004 (4. Auflage).
- [Müller 1996] MÜLLER, N.: *Autonomes Manövrieren und Navigieren mit einem sehenden Straßenfahrzeug*. Bd. 281. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Dissertation, 1996.
- [Müller u. Rohleder 2006] MÜLLER, T.; ROHLEDER, D.: Automatisches Spurfahren auf Autobahnen. In: *Fahrdynamik-Regelungen*. Vieweg & Sohn Verlag, 2006, S. 285–306.
- [Mock-Hecker 1994] MOCK-HECKER, R.: *Wissensbasierte Erkennung kritischer Verkehrssituationen - Erkennung von Plankonflikten*. Bd. 209. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Dissertation, 1994.
- [Mueller-Bessler et al. 2006] MUELLER-BESSLER, B.; STOCK, G.; HOFFMANN, J.: Reproduzierbares Fahren im Grenzbereich. In: *race.tech*. München, 2006.
- [Nagel u. Enkelmann 1991] NAGEL, H.-H.; ENKELMANN, W.: Generic Road Traffic Situations and Driver Support Systems. In: *Proceedings of the 5th Prometheus Workshop*. München, 1991, S. 76–85.
- [Nagel et al. 1995] NAGEL, H.-H.; ENKELMANN, W.; STRUCK, G.: FhG-Co-Driver: From Map-Guided Automatic Driving by Machine Vision to a Cooperative Driver Support. In: *Mathematical and Computer Modelling* 22 (1995), Nr. 4-7, S. 185–212.

- [Naseath 2007] NASEATH, G.B.: *Reducing Curvature in Complex Tool Paths by Deviating From CAM-Produced Tool Paths Within A Tolerance Band*, Brigham Young University, Mastersthesis, 2007.
- [Navlab 2009] *Navlab: The Carnegie Mellon University Navigation Laboratory*. Version: 28. Dezember 2009. <http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/www/index.html>. Webseite.
- [Neumaier u. Färber 2006] NEUMAIER, S.; FÄRBER, G.: Videobasierte Fahrspurerkennung zur Umfelderkennung bei Straßenfahrzeugen. In: LEVI, P. (Hrsg.); SCHANZ, M. (Hrsg.); LAFRENTZ, R. (Hrsg.); AVRUTIN, V. (Hrsg.): *Autonome Mobile Systeme 2005*. Springer Berlin / Heidelberg, 2006 (Informatik aktuell), S. 173–178.
- [NFF 2010] *Niedersächsisches Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik*. Version: 30. Juni 2010. <http://nff.tu-bs.de/>. Webseite.
- [Office 2001] OFFICE, Congressional B.: *The National Defense Authorization Act for Fiscal Year 2001*. 2001.
- [Öttgen 2005] ÖTTGEN, O.: *Zur modellgestützten Entwicklung eines mechatronischen Fahrwerkregelsystems für Personenkraftwagen*. Bd. 610. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Dissertation, 2005.
- [Öttgen u. Bertram 2007] ÖTTGEN, O.; BERTRAM, T.: Modellgestützte Entwicklung eines mechatronischen Fahrwerkregelsystems. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 6 (2007), S. 547–553.
- [Pacejka 2002] PACEJKA, H.B.: *Tyre and Vehicle Dynamic*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2002.
- [Pellkofer 2003] PELLKOFER, M.: *Verhaltensentscheidung für autonome Fahrzeuge mit Blickrichtungssteuerung*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003.
- [Perzborn 2008] PERZBORN, P.: *Längsführung eines autonomen Straßenfahrzeugs*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2008.
- [Piazzzi u. Guarino Lo Bianco 2000] PIAZZZI, A.; GUARINO LO BIANCO, C.: Quintic G^2 -Splines for Trajectory Planning of Autonomous Vehicles. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Dearborn, MI, 2000, S. 198–203.
- [Piegl u. Tiller 1997] PIEGL, L.; TILLER, W.: *The NURBS Book*. Springer Berlin / Heidelberg, 1997.

- [Pomerleau u. Jochem 1996] POMERLEAU, D.; JOCHEM, T.: Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering. In: *IEEE Expert* 11 (1996), Nr. 2, S. 19–27.
- [Popp u. Schiehlen 1993] POPP, K.; SCHIEHLEN, W.: *Fahrzeugdynamik*. Stuttgart: B.G. Teubner Verlag, 1993.
- [Prautzsch et al. 2002] PRAUTZSCH, H.; BOEHM, W.; M., Paluszny: *Bezier and B-Spline Techniques*. Springer Berlin / Heidelberg, 2002.
- [Quinlan 1994] QUINLAN, S.: *Real-Time Modification of Collision-Free Paths*. Stanford University, Dissertation, 1994.
- [Rasmussen 1983] RASMUSSEN, J.: Skills, Rules, and Knowledge: Signals, Signs, and Symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 13 (1983), S. 257–266.
- [Rauskolb et al. 2008] RAUSKOLB, F. W.; BASARKE, C.; BERGER, C.; BERGER, K.; CORNELSEN, K.; DOERING, M.; EFFERTZ, J.; FORM, T.; GRAEFE, F.; GÜLKE, T.; HECKER, P.; HOMEIER, K.; KLOSE, F.; LIPSKI, C.; MAGNOR, M.; MORGENROTH, J.; NOTHDURFT, T.; OHL, S.; RUMPE, B.; SCHUMACHER, W.; WILLE, J.M.; WOLF, L.: Caroline: An Autonomously Driving Vehicle for Urban Environments. In: *Journal of Field Robotics* (2008), S. 674–724.
- [Reichel 2011] REICHEL, M.: *Situationsanalyse für fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme*. Technische Universität Braunschweig, Dissertation, angekündigt, 2011.
- [Reichel et al. 2010] REICHEL, M.; BOUZOURAA, M.E.; SIEGEL, A.; SIEDERSBERGER, K.-H.; MAURER, M.: Erweiterte Umfelderkennung und Nutzung einer Ausweichanalyse als Grundlage einer aktiven Gefahrenbremsung. In: *11. Braunschweiger Symposium AAET*, 2010, S. 149–169.
- [Reschka et al. 2010] RESCHKA, A.; NOTHDURFT, T.; WILLE, J.M.: Sicherheitskonzept für automatisierte Fahrmanöver des Versuchsträgers Leonie im Projekt Stadtpilot / Technische Universität Braunschweig. 2010. – Forschungsbericht.
- [Rill 1994] RILL, G.: *Simulation von Kraftfahrzeugen*. Braunschweig: Vieweg Verlag, 1994.
- [Rosenblatt 1997] ROSENBLATT, J.K.: *DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Diss., 1997.

- [RTI 2010] *Real-Time Innovations*. Version: 30. Mai 2010. <http://www.rti.com/>. Webseite.
- [Sasse et al. 2009] SASSE, A.; NOTHDURFT, T.; HECKER, P.: Robust Car Localization for an Autonomous Vehicle in Urban Environments. In: *Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Savannah, GA, 2009, S. 1797–1806.
- [Saust 2007] SAUST, F.: *Querregelung eines autonomen Straßenfahrzeugs*, Technische Universität Braunschweig, Studienarbeit, 2007.
- [Saust 2008] SAUST, F.: *Optimierung der Bahnplanung für die autonome Fahrzeugführung*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2008.
- [Saust et al. 2010] SAUST, F.; BLEY, O.; KUTZNER, R.; WILLE, J.M.; FRIEDRICH, B.; MAURER, M.: Exploitability of Vehicle Related Sensor Data in Cooperative Systems. In: *Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Funchal, 2010, S. 1724–1729.
- [Saust et al. 2009] SAUST, F.; MÜLLER, T.; WILLE, J.M.; MAURER, M.: Entwicklungsbegleitendes Simulations- und Testkonzept für autonome Fahrzeuge in städtischen Umgebungen. In: *10. Braunschweiger Symposium AAET*, 2009, S. 87–107.
- [Schabenberger 2007] SCHABENBERGER, R.: ADTF: Engineering-Framework für Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme. In: *13. Internationaler Kongress Elektronik im Kraftfahrzeug*, 2007.
- [Schanz 2000] SCHANZ, M.: *Allgemeine numerische Methoden, Skriptum zur Vorlesung*. Technische Universität Braunschweig, 2000.
- [Scheide 2009] SCHEIDE, T.: *Aufbau erster Module einer Situationsanalyse des autonomen Straßenfahrzeugs Leonie*, Technische Universität Braunschweig, Studienarbeit, 2009.
- [Schimmelpfennig u. Hebing 1982] SCHIMMELPFENNIG, K.-H.; HEBING, H.: Geschwindigkeiten bei kreisförmiger Kurvenfahrt - Stabilitäts- und Sicherheitsgrenze. In: *der Verkehrsunfall* 05 (1982), S. 97–99.
- [Schimmelpfennig u. Nackenhorst 1985] SCHIMMELPFENNIG, K.-H.; NACKENHORST, U.: Bedeutung der Querbesehleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 4 (1985), S. 94–96.

- [Schorn 2007] SCHORN, M.: *Quer- und Längsregelung eines Personenkraftwagens für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung*. Bd. 651. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Dissertation, 2007.
- [Shladover 1992] SHLADOVER, S.E.: The California PATH Program of IVHS Research and its Approach to Vehicle-Highway Automation. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*. Detroit, MI, 1992, S. 347–352.
- [Shladover 2006] SHLADOVER, S.E.: PATH at 20 – History and Major Milestones. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Toronto, 2006, S. 1_22–1_29.
- [Söhnitz 2001] SÖHNITZ, I.: *Querregelung eines autonomen Strassenfahrzeugs*. Bd. 882. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8, Dissertation, 2001.
- [Siedersberger 2003] SIEDERSBERGER, K.-H.: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2003.
- [Simon u. Becker 1999] SIMON, A.; BECKER, J.C.: Vehicle Guidance for an Autonomous Vehicle. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Tokyo, 1999, S. 429–434.
- [Smartway 2011] *Smartway Project Advisory Committee*. Version: 07. August 2011. http://www.mlit.go.jp/road/ITS/topindex/topindex_smartway.html. Webseite.
- [Stadt Braunschweig 2011] *Verkehrsmengenkarten für Braunschweig*. Version: 15. Januar 2011. http://www.braunschweig.de/leben/stadtplan_verkehr/verkehrsplanung/verkehrsmengenkarten.html. Webseite.
- [Statistisches Bundesamt Deutschland 2011] *Statistisches Bundesamt Deutschland*. Version: 15. Januar 2011. <http://www.destatis.de/>. Webseite.
- [Stiller et al. 2008] STILLER, C.; KAMMEL, S.; PITZER, B.; ZIEGLER, J.; WERLING, M.; GINDELE, M.; JAGSZENT, D.: Team AnnieWAY's Autonomous System. In: *Robot Vision*. Springer Berlin / Heidelberg, 2008, S. 248–259.
- [Struck et al. 1994] STRUCK, G.; GEISLER, J.; LAUBENSTEIN, F.; NAGEL, H.-H.; SIEGLE, G.: Multi-Camera Vision-Based Autonomous Maneuvering at Road Intersections. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Paris, 1994, S. 189–194.

- [Taniguchi et al. 1991] TANIGUCHI, M.; HOSAKA, A.; KURAMI, K.; TAKEI, A.: The Development of Autonomously Controlled Vehicle, PVS. In: *IEEE International Conference on Vehicle Navigation and Information Systems* Bd. 2, 1991, S. 1137–1141.
- [Team Annieway 2009] Version: 28. Dezember 2009. <http://www.mrt.uni-karlsruhe.de/annieway.php>. Webseite.
- [Thorpe et al. 1988] THORPE, C.; HEBERT, M.; KANADE, T.; SHAFER, S.: Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Bd. 10. 1988, S. 362–373.
- [Thrun et al. 2006] THRUN, S.; MONTEMERLO, M.; DAHLKAMP, H.; STAVENS, D.; ARON, A.; DIEBEL, J.; FONG, P.; GALE, J.; HALPENNY, M.; HOFFMANN, G.; LAU, K.; OAKLEY, C.; PALATUCCI, M.; PRATT, V.; STANG, P.: Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. In: *Journal of Field Robotics* 23 (2006), Nr. 9, S. 661–692.
- [Thuy et al. 2008] THUY, M.; GOEBL, M.; RATTEI, F.; ALTHOFF, M.; OBERMEIER, F.; HAWE, S.; NAGEL, R.; KRAUS, S.; WANG, C.; HECKER, F.; RUSS, M.; SCHWEITZER, M.; PUENTE LEÓN, F.; FÄRBER, G.; BUSS, K. M. D. M. Diepold; EBERSPÄCHER, J.; HEISSING, B.; WÜNSCHE, H.-J.: Kognitive Automobile - Neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereiches/TR-28. In: *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München, 2008.
- [Tölle 1996] TÖLLE, W.: *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*. Bd. 299. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 12, Dissertation, 1996.
- [Tsugawa 1994] TSUGAWA, S.: Vision-Based Vehicles in Japan: Machine Vision Systems and Driving Control Systems. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 41 (1994), Nr. 4, S. 398–405.
- [Tsugawa et al. 1979] TSUGAWA, S.; YATABE, T.; HIROSE, T.; MATSUMOTO, S.: An Automobile with Artificial Intelligence. In: *Proceedings of the 6th International Joint Conference on Artificial Intelligence* Bd. 2. Tokyo, 1979, S. 893–895.
- [Ulmer 1992] ULMER, B.: VITA - An Autonomous Road Vehicle (ARV) for Collision Avoidance in Traffic. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Detroit, MI, 1992, S. 36–41.
- [UniBW 2009] *Webseite der Universität der Bundeswehr München*. Version: 28. Dezember 2009. <http://www.unibw.de/>. Webseite.

- [Van Zanten 2006] VAN ZANTEN, A.: Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP). In: *Fahrdynamik-Regelungen*. Vieweg & Sohn Verlag, 2006, S. 169–211.
- [von Vietinghoff 2008] VIETINGHOFF, A. von: *Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen*. Universitätsverlag Karlsruhe, Dissertation, 2008.
- [VisLab 2009] *VisLab Homepage*. Version: 28. Dezember 2009. <http://vislab.it/>. Webseite.
- [Walton 2009] *Robots Fail to Complete Grand Challenge*. Version: 28. Dezember 2009. <http://www.cnn.com/2004/TECH/ptech/03/14/darpa.race/index.html>. Webseite.
- [Weisser et al. 1998] WEISSER, H.; SCHULENBERG, P.; BERGHOLZ, R.; LAGES, U.: Autonomous Driving on Vehicle Test Tracks: Overview, Motivation and Concept. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles* Bd. 2. Stuttgart, 1998, S. 439–443.
- [Werling et al. 2010] WERLING, M.; ZIEGLER, J.; KAMMEL, S.; THRUN, S.: Optimal Trajectory Generation for Dynamic Street Scenarios in a Frenét Frame. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Anchorage, AK, 2010, S. 987–993.
- [Wille et al. 2009] WILLE, J. M.; HOMEIER, K.; MATTHAEI, R.; NOTHDURFT, T.; OHL, S.; SASSE, A.; SAUST, F.; HECKER, P.; MAURER, M.; SCHUMACHER, W.; WOLF, L.: Der Stadtpilot Autonomes Fahren auf dem Braunschweiger Stadtring. In: *10. Braunschweiger Symposium AAET*, 2009, S. 27–48.
- [Wille u. Form 2008a] WILLE, J.M.; FORM, T.: Low Level Control in a Modular System Architecture for Realizing Precise Driving Maneuvers of the Autonomous Vehicle Caroline. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Transportation Systems Conference*. Peking, 2008, S. 705–710.
- [Wille u. Form 2008b] WILLE, J.M.; FORM, T.: Realizing Complex Autonomous Driving Maneuvers the Approach Taken by Team CarOLO at the DARPA Urban Challenge. In: *IEEE Proceedings of the Vehicular Electronics and Safety Conference*. Columbus, OH, 2008, S. 232–236.
- [Wille et al. 2010a] WILLE, J.M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Comprehensive Treated Sections in a Trajectory Planner for Realizing Autonomous Driving in Braunschweig’s Urban Traffic. In: *IEEE Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Funchal, 2010, S. 1724–1729.

- [Wille et al. 2010b] WILLE, J.M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Smooth Autonomous Driving on Braunschweig’s Inner Ring Road. In: *International Conference on Intelligent Autonomous Systems*. Ottawa, 2010, S. 227–236.
- [Wille et al. 2010c] WILLE, J.M.; SAUST, F.; MAURER, M.: Stadtpilot: Driving Autonomously on Braunschweig’s Inner Ring Road. In: *IEEE International Conference on Intelligent Vehicles*. San Diego, CA, 2010, S. 506–511.
- [Yokoyama et al. 1993] YOKOYAMA, T.; TACHIBANA, A.; SUZUKI, T.; INOUE, H.: Automated Vehicle System Using Both A Computer Vision And Magnetic Field Sensors. In: *IEEE Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Tokyo, 1993, S. 157–162.
- [Zapp 1988] ZAPP, A.: *Automatische Straßenführung durch Rechnersehen*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 1988.
- [Ziegler u. Stiller 2009] ZIEGLER, J.; STILLER, C.: Spatiotemporal State Lattices for Fast Trajectory Planning in Dynamic On-road Driving Scenarios. In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. St. Louis, MO, 2009, S. 1879–1884.
- [Ziegler u. Stiller 2011] ZIEGLER, J.; STILLER, C.: Optimale Trajektorienplanung für Automobile. In: *45. Regelungstechnisches Kolloquium*. Boppard, 2011.
- [Zomotor 1987] ZOMOTOR, A.: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Vogel, 1987.